

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**INDUKČNÍ PÁJENÍ TRUBKOVÝCH ROZVODŮ Z
VYSOKOLEGOVANÝCH OCELÍ
(INDUCTION BRAZING OF STAINLESS STEELS
PIPELINES)**

Student:

Bc. Dobeš Václav

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Václav Dobeš**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Indukční pájení trubkových rozvodů z vysokolegovaných ocelí**
Induction Brazing of Stainless Steels Pipelines

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te studii technologie indukčního pájení.
2. Charakterizujte použité materiály.
3. Navrhněte a realizujte experimentální program ověření vlastností pájených spojů.
4. Definujte základní typy vad vznikajících při daném procesu.
5. Proved'te vyhodnocení a diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
Ruža, V. *Pájení*. SNTL 1988.
Luvata. *Brazing Handbook*. Luvata 2006.
HUMPSTONE G., JACOBSON D.M. *Principle of Soldering and Brazing*. 1st ed. ASM. Materials Park, OH, 2005.

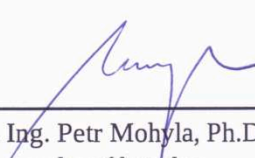
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015




doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě : 15.5.2015



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15.5.2015



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Václav Dobeš

Adresa trvalého pobytu autora práce: Raškov 61, Bohdík

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

DOBEŠ, V. *Indukční pájení trubkových rozvodů z vysokolegovaných ocelí: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2015, 66 s., Vedoucí práce: Ochodek, V.

Diplomová práce se zabývá indukčním pájením trubek z vysokolegované oceli. V úvodní teoretické části jsou uvedeny základní údaje o pájené trubce z vysokolegované oceli. Dále jsou uvedeny vady, které vznikají při indukčním pájení. V dalších kapitolách je rozdělení pájení, tavidla, charakterizováno indukční pájení, vliv parametrů indukčního pájení na vznik vyhovujícího spoje. Dále jsou rozebrány pájky na bázi mědi a zařízení, které se používají pro indukční pájení. V experimentální části je popsáno indukční pájení ve firmě EFD Induction. Dále experimenty indukčního pájení trubky z vysokolegované oceli prováděné ve firmě ZKL Hanušovice. Volba zařízení pro indukční pájení. V další část diplomové práce jsou shrnuty operace po indukčním pájením. V závěru diplomové práce je vyhodnocení dosažených výsledků.

ANOTATION OF MASTER THESIS

DOBEŠ, V. *Induction Brazing of Stainless Steels Pipelines*: Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2013, 66 p., Thesis, head: Ochodek, V.

This thesis deals with the induction soldering pipes from high-alloy steels . The first theoretical part describes basic informations about pipe from high-alloy steel. The next chapter is focused on defects that arise during induction soldering . Next part describes soldering, fluxes, characteristic of induction soldering and influence parameters on the creation of perfect join. There are also analyzed solder based on copper and devices used for induction soldering . The experimental section describes induction soldering in the company EFD Induction, experiments of induction soldering pipes from high-alloy steel made in ZKL Hanušovice and the choice of device for induction soldering . In the following part of the thesis are summarized operations after induction soldering. The end of the thesis evaluates achieved results.

Obsah

Seznam použitého značení:.....	8
1. Úvod.....	9
2. Rozdělení metod pájení	10
2.1 Rozdělení podle pracovní teploty a metody pájení	10
2.1.1 Měkké pájení	10
2.1.2 Tvrdé pájení.....	11
2.1.3 Lokání pájení	11
2.1.4 Celoobjemové pájení	12
2.1.5 Tavidla.....	12
2.1.6 Pájky	13
2.2 Vady při pájení	18
2.2.1 Charakteristika vad pájených spojů.....	19
3. Indukční pájení	24
3.1 Indukční ohřev	24
3.1.1 Induktory	25
3.1.2 Účinnost ohřevu.....	26
3.1.3 Parametry ohřevu.....	27
3.1.4 Vliv tepelné vodivosti.....	27
3.1.5 Vliv tepelné kapacity	28
3.1.6 Vliv vzdálenosti cívky	30
3.1.7 Vliv frekvence	32
3.1.8 Vliv příkonu.....	33
3.2 Zařízení pro indukční pájení	34
3.2.1 Chlazení pro indukční zařízení	35
4. Charakteristika pájené součásti.....	37
4.1 Materiály pájeného celku	37
4.2 Jednotlivé části sestavy	39
5. Návrh a ověření vlastností indukčně pájených spojů.....	42
5.1 Stávající technologie - pájení v pecích.....	42
5.2 Návrh spoje pro pájený materiál	43
5.3 Návrh pájky a tavidla pro indukční pájení	43
5.4 Aplikace ohřevu pájení	43
5.5 Volba zařízení pro indukční pájení	44

5.6 Příprava odvodušňovací trubky před indukčním pájením.....	45
5.7 Indukční pájení trubky z vysokolegované oceli.....	48
5.7.1 Zkoušky provedené indukčním pájením	48
5.7.2 Vyhodnocení experimentu indukčního pájení.....	54
5.8 Návrh snížení zmetkovitosti indukčně pájeného dílce.....	56
5.8.1 Vliv odmaštění dílu	56
5.8.2 Vliv kompletace dílu před indukčním pájením	57
5.9 Vady, které vznikaly při indukčním pájení	57
5.10 Operace odvodušňovací trubky po indukčním pájením	58
6. Závěr a zhodnocení dosažených výsledků.....	63
Použitá literatura	65

Seznam použitého značení:

Značení	Význam	Jednotka
R_m	mez pevnosti materiálu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu materiálu	[MPa]
A	tažnost	[%]
H	teplo indukované v obrobku	[°C]
α	přímá úměra	[-]
I	množství proudu indukovaného v obrobku	[A]
R	elektrický odpor v obrobku	[Ω]
f	Frekvence indukčního výkonu	[Hz]
d	vzdálenost mezi obrobkem a induktorem	[mm]
δ	hloubka penetrace	[mm]
ρ	elektrický odpor materiálu	[Ω]

1. Úvod

Automobilový průmysl je strojírenské odvětví, které se zabývá nejen výrobou a vývojem ale také marketingem. V současné době po celém světě nespočet automobilek. Největší automobilka na světě je Toyota. V České republice se podařilo automobilovému průmyslu rozvinout ve vyspělou základnu. Produkce přesahuje více než 20% objemu výroby. Český automobilový průmysl se může pyšnit mnoha úspěchy ve výrobě automobilů. Přes 120 tisíc lidí v České republice pracuje v automobilovém průmyslu. Nejprodávanejším vozem v České republice je Škoda Fabia. Automobilový průmysl se každým rokem zdokonaluje na vyšší úroveň.

Firma ZKL Hanušovice se zabývá výrobou přesně ohýbaných trubek pro automobilový průmysl ale také výrobou vysoko rozměrových mosazných klecí do ložisek a výrobou valivých tělísek do ložisek. Firma ZKL Hanušovice vyrábí trubky pro přední světové značky Volkswagen, Audi, BMW nebo Porsche již 20 let. Pájení trubkových rozvodů z vysokolegovaných ocelí patří mezi nové technologie firmy. Trubkové rozvody z vysokolegovaných ocelí se nejčastěji používají jako chladicí systémy motorů pro odvodušňování, olejové systémy motorů nebo topení. Výsledný produkt slouží jako odvodušňovací potrubí. V současné době firma zaznamenala velký nárůst zakázek a projektů, které se zabývají pájením trubkových rozvodů z vysokolegovaných ocelí z materiálů EN 10088.

Indukční pájení trubkových rozvodů z vysokolegovaných ocelí přináší řadu problémů. Nejčastější vnější vady jsou pórovitost, neúplné zaplnění spoje atd. K vnitřním vadám patří trhliny, vměstky apod. Cílem této diplomové práce je indukčně zapájet spoj, tak aby byla dosažena kvalita spoje, vzhled. Dále volba vhodného zařízení pro indukční pájení.

2. Rozdělení metod pájení

Pájení je druh spojování materiálů pomocí pájky s nižší teplotou, než je teplota tavení spojovaných součástí. Cílem pájení je zhotovit nerozebíratelný spoj. Spoj vzniká pomocí přídavného materiálu, který je roztavený tzv. pájka. U pájení se pájený materiál, který chceme pájet neroztaví jako například u svařování. Zde se taví pouze pájka. Před pájením můžeme použít tavidlo, které nám odstraní nečistoty. Pájení rozdělujeme podle pracovní teploty nebo podle metody nanášení. [1,3]

Výhody pájení

- spojování běžných materiálů - sklo, keramika,
- spojování součástí s velkým rozdílem stěn,
- nižší teploty jak při svařování,
- vznik elektricky vodivých spojů,
- vznik vodotěsných a tepelně vodivých spojů.

Nevýhody pájení

- malá pevnost spojení,
- malá korozivzdornost z důvodů rozdílného materiálu pájky a základního materiálu,
- malé tolerance na spáry mezi materiály. [1,3]

2.1 Rozdělení podle pracovní teploty a metody pájení

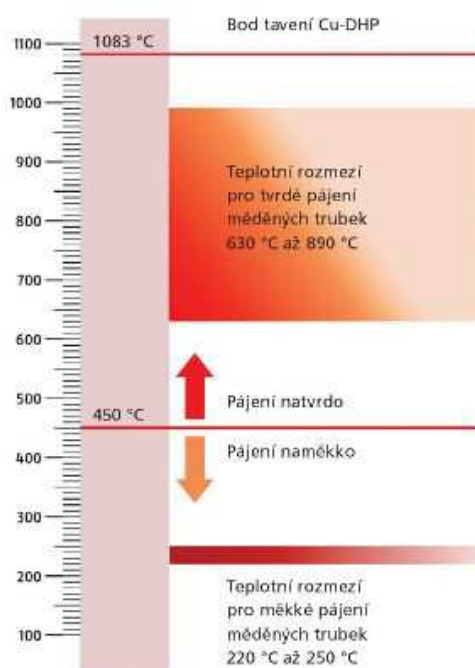
2.1.1 Měkké pájení

Měkké pájení využívá nízkou teplotu tavení pájky, která nepřesahuje teplotu 450°C. Tímto pájením se zejména spojují elektrické obvody. Pájení lze provést pomocí tvz. transformátové páječky nebo plně automaticky například v peci. Pájený spoj na měkko se vyznačuje relativně malou pevností a využívá se u zařízení, které jsou méně namáhány. [1,3]

2.1.2 Tvrdé pájení

Tvrdé pájení se používá především u spojů, které jsou elektricky, tepelně a mechanicky namáhány. Tvrdé pájení se používá pro více zatížené spoje jakou jsou například příruby trubek a také při pájení žárupevných a žáruvzdorných ocelí. Dále se tvrdé pájení používá na pájení měděných trubek, při instalaci vody, pájení rozvodů plynů apod.

Teplota při tvrdém pájení se pohybuje přibližně nad teplotou 450°C do teploty, kdy se začne tavit pájka. Teplota pájky je závislé víceméně na teplotě dané pájky. [1,3]



Obr. 1 Teplotní rozmezí pájení[2]

2.1.3 Lokální pájení

Lokální pájení znamená ohřev konkrétního místa. U měkkého pájení se provádí dotekem horkého tělíska páječky. Těleso se ohřívá odporovým průchodem elektrického proudu nebo nepřímým elektrickým topným tělesem. Dále můžeme pro ohřev použít plamen nebo proud horkého plynu. Plyn se vzduchem postačuje u měkkého pájení. Pro tvrdé pájení plamenem se používá kyslíko-acetylenový plamen. Indukční ohřev je produktivní metoda, kdy cívka je přizpůsobena tvaru součásti, kterou chceme pájet. Použití například u pájení břitových destiček. [7]

2.1.4 Celoobjemové pájení

U celoobjemového pájení se zahřívá celá pájená součást. Nejčastěji je teplo předáváno sáláním z topného tělesa. Ve vakuové peci nebo vedením plynem v peci s redukční atmosférou. Celoobjemové pájení dělíme podle nanášení pájky na nánosové a kapilární pájení.

- Nánosové - klasické pájení, kdy se roztavená pájka nanese na spojovaný materiál,
- Kapilární pájení - metoda kdy jsou pájené materiály zajištěny proti posunutí. Do pájené mezery je vnesená pájka a tavidlo a ke spoji dojde po ohřátí v peci. Pájka se rozteče a zateče do spoje. [7]

2.1.5 Tavidla

Hlavním kritériem kromě pájitelnosti základního materiálu přídavným materiálem je rychlost reakce tavidla a teplota pájení. Požadavky tavidla jsou co nejlépe podporovat smáčení základního materiálu pájkou. Dále schopnost co nejrychleji rozpouštět oxidy základního materiálu a pájky ještě před samotným pájením. Stálost fyziko-chemických vlastností při pájení tj. dobrá viskozita, povrchové napětí, interval teplot tavení a hustota. Minimální tvorba kovových par a plynů při pájení. [4]

Tavidlo by mělo dobře smáčet základní materiál a pájku. Teplota tání musí být o 50 - 150°C nižší než teplota tání pájky, aby tavidlo mohlo využívat rozpouštěcích schopností ještě než se pájka roztaví. Reakční rychlost tavidla znamená, že do působení tavidla se zahrnují veškeré reakce. Množství naneseného tavidla závisí na tloušťce a také rozsahu oxidických vrstev. Viskozita tavidla by měla být minimální v oblasti pracovních teplot pájky do teploty 200°C. Tavidla s krystalickou strukturou jsou lepší a mají zpravidla lepší pájecí vlastnosti než tavidla se sklovitou strukturou. Krystalická struktura tavidel umožňuje odchod plynů z pájeného spoje proto tavidlo musí mít po dobu pájení stejné povrchové napětí. Úlohou tavidla je rovnoměrně pokrýt pájený spoj a zamezit přístupu vzduchu do roztavené pájky a tím chránit základní materiál a pájku před oxidací. Hustota pájky musí být vždy vyšší než hustota tavidla, aby byl dobrý odchod nečistot z pájky povrch základního

materiálu. Zbytky tavidla by po pájení měli jít snadno odstranit a nesmí být příčinou koroze. Tavidlo by nemělo být zdraví škodlivé.

Tavidlo je většinou při teplotě okolí pevný a tuhý materiál, který se ohřevem taví. Ve výhodnějších případech se používá tavidlo ve formě pasty. Směs tavidla musí vytvářet s rozpouštědlem hladkou pastu bez větších krystalů. Tavidlo by mělo být dlouhodobě použitelné a po ohřátí musí zaručovat dobré krytí spoje. [4]

Druhy tavidel dělíme podle typu pájení zda se jedná o měkké nebo tvrdé pájení. Dělíme na:

- tavidla s leptavým účinkem,
 - s kyselinotvornými a halovými složkami
- tavidla bez leptavého účinku.
 - na bázi pryskyřice[4]



Obr. 2 Tavidla [1,6]

2.1.6 Pájky

Pájka je přídatný materiál, který se používá při pájení. Vlastnosti jednotlivých pájek se posuzují z mnoha hledisek.

- a) Pájka by měla mít nižší teplotu než spojovaný materiál.
- b) Interval tavení pájky určené pro kapilární pájení by měl být úzký tedy menší jak 100°C nebo se volí eutektické složení pájky.
- c) Pájka nemusí mít stejné nebo podobné chemické složení jako spojovaný materiál.

- d) U kapilárního pájení je nutné aby pájka měla dobré pájecí vlastnosti tedy smáčivost a roztékavost. Tyto vlastnosti jsou dány chemickým složením pájky.
- e) Jelikož pájky obsahují nečistoty, které nám zhoršují deformační vlastnosti v přechodové oblasti spoje neboli korozní odolnost spoje, je zapotřebí zajistit vysokou čistotu surovin pro výrobu pájek.
- f) Základní materiál a složení pájky mají mít určitou rozpustnost a difuzní schopnost. Toto však závisí na kombinaci základní materiál vs. pájka, teplotě a době pájení.
- g) Výhodné je, když pájka v roztaveném stavu velmi malé povrchové napětí. Povrchové napětí u měděných pájek je až $1\ 100\ \text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$.
- h) Z důvodu pozdější koroze je výhodnější použít pájku jejíž prvky mají malý rozdíl elektrochemického potenciálu.
- i) Pájka musí mít dobré mechanické vlastnosti - pevnost v tahu, smyku, tvrdost popř. tažnost ale také musí mít schopnost vytvářet pevné spoje.
- j) Čisté kovy mají velmi dobré pájecí vlastnosti, tažnost, ale také mají nižší pevnost. Eutektické pájky mají stejné vlastnosti ale vykazují zvýšenou tvrdost, křehkost a pevnost.

Z toho nám vyplývá, že je zapotřebí mít velké množství pájek. Vývoj pájek ve vyspělých státech výrazně pokračuje, zejména pro speciální způsoby pájení. Pro základní materiály jsou určeny hned několik pájek pro jiné materiály pouze jedna. [4]

2.1.6.1 Pájky na bázi mědi

Pájky v této skupině jsou vhodné pro pájení neželezných i železných kovů s teplotou tání na 1000°C . Nejčastěji používané pájky jsou uvedeny v tab. 1.

Tab.1 Druhy pájek z mědi a jejich slitin[4]

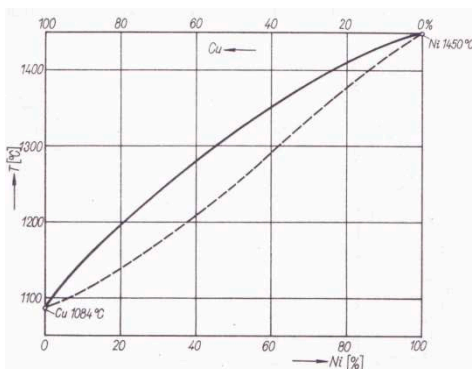
Značení pájky podle ČSN			Chemické složení [%]								Výrobní tvar*)	Pracovní teplota [°C]
číselné	symbolické	Cu	Zn	Si	Sn	Fe	Mn	Pb	Al	P		
05 5680	B – CuP10 – 770/710	zbytek	0,05		0,2	0,2	–	0,1	–	8,8 – 11	F ¹⁾	750 až 800
05 5684	B – Cu60ZnAg – 900/880	58,0 – 60,5	zbytek	zbytek 0,1 – 0,3	0,15 – 0,35	0,2 Ag 0,4	0,1	0,05	0,05	0,05	A, B ³⁾	920 až 950
05 5686	B – Cu60ZnSi – 900/880	59,0 – 61,0	zbytek	0,1 – 0,2	0,13 – 0,23	max. 0,1	P 0,1	0,08	0,01	0,01	A ²⁾ , ³⁾	920 až 950
05 5682	B – Cu50ZnNi – 920/890	49,0 – 51,5	zbytek	0,1 – 0,3	0,1 – 0,35	Fe + Mn 0,2	8,0 – 10,0 Ni	0,02	0,01		A, B ³⁾	930 až 970
42 3001	E – Cu	99,90	–	–	–	–	–	–	–	0,02 – 0,05	A, B ⁴⁾	1 130 až 1 150

Výrobní tvar *): A – tyče tvářené, B – dráty, F – tyče lité

Tab. 13. Odpovídající značení pájek na bázi mědi podle ČSN a podle zahraničních norem a obchodních značek

Podle ČSN (viz tab. 12)	Podle GOST	Podle TGL 14 908	Podle DIN 2513	Podle firemního značení			
				UTP	DODUCO	ÖGUSSA	CASTOLIN
E – Cu	M0, M1, M2	L – Cu	L – Cu, LSCu	–	–	Silox S1, S10	–
B – CuP10	PMF1	L – CuP8	L – CuP8	UTP 37	L – CuP8	Silox S5	Ca800
B – Cu60ZnAg	–	–	–	–	–	–	–
B – Cu60ZnSi	P – L62	L – Ms60	L – Ms60	–	–	Silox S21	Ca18
B – Cu50ZnNi	–	L – Ns	L – Ns	UTP 6,2	–	Silox S3	Ca16, Ca185

Pájky *E – Cu* z čisté, bezkyslíkaté mědi se používají pro kapilární pájení vysokotavitelných materiálů jako jsou nikl nebo ocel. Pájka má dobrou roztékavost a nízkou viskozitu, která dobře zaplňuje i velmi malé mezery okolo 0,02mm. Dále má dobrou tvárnost a dobře vzdoruje teplotám do 350°C. Pracovní teplota pájení je kolem 1150°C. Měděná pájka se vyrábí ve formě pásků, drátů, fólií, pasty a pruhů. Pájka se nejlépe používá při pájení v průběžné peci s redukční atmosférou bez použití tavidla. Pro legované oceli a slitiny *Ni* se používá větší mezera ve spoji nad 0,025mm. Z toho důvodu, že *Cu* má s *Ni* neomezenou rozpustnost viz. obr.3. Při pájení se roztavená pájka stále více obohacuje *Ni* a v závislosti na čase se tvoří více nebo méně niklem legovaná oblast spoje. S větším přírůstkem niklu v pájce stoupá teplota tání pájky. Měď a nikl tvoří nepřetržitou řadu tuhých roztoků. Při legování pájky můžeme dosáhnout stupně, kdy pájka při dodržení správné pájecí teploty může předčasně ztuhnout. K tomuto jevu dochází jestliže obsah niklu v pájce zvýší likvid, tak aby ležel nad původní teplotou pájení. Toto legování pájky základním materiálem může nastat i při jiných kombinacích materiálů. Malé množství nečistoty v pájce mění hlavní pájecí vlastnosti. Jako nežádoucí prvek je *Fe*, který zhoršuje tekutost pájky, protože zvyšuje její viskozitu. Při 5% železa může pájka vyplnit mezeru až kolem 1,8mm. V tomto případě se dosahuje vhodného poměru přechodu pájky.

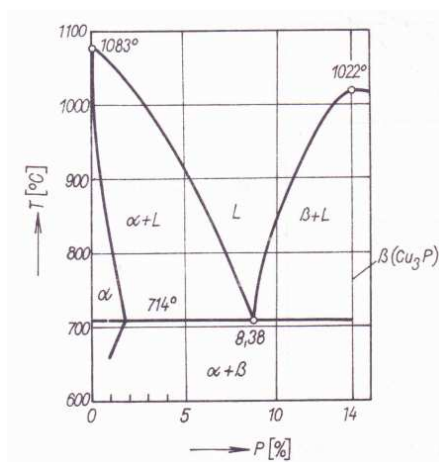


Obr. 3 Rovnovážný diagram slitiny Cu - Ni [4]

Pájky Cu - P10 je slitina, která odpovídá složení kolem eutektickému bodu viz obr. 4. Použití pro pájení mědi a jejich slitin. Naopak pro pájení, kde Ni přesahuje 10% je nevhodná, protože při použití se tvoří přechodové oblasti. Struktura pájky je eutektická se složením Cu - Cu₃P, kde jsou rozptýleny útvary tuhého roztoku Cu. Pokud budeme pájet měď pájkou Cu - P10 nemusíme používat tavidlo. U pájení plamenem shoří většina fosforu na oxid fosforečný. Ten reaguje v oblasti pájení s oxidem měďným na fosforečnan měďný podle této rovnice:



Zde nemusíme předpokládat náklady na odstranění tavidla. Při pájení mosazi nebo bronzu musíme použít tavidlo. V pájené ploše při ohřevu se tvoří pevný povrchový oxid zinku, neboli cínu, který je potřeba před pájením odstranit. Pájka Cu - P10 je nejvhodnější při pájení plamenem. Pro tuto pájku je nejvhodnější spoj přeplátovaný s mezerou 0,1mm. [4]



Obr. 4 Rovnovážný diagram slitiny Cu - P [4]

Pájky mosazné se skládají ze slitiny $Cu - Zn$ s pracovní teplotou pájení kolem $900^{\circ}C$. Obrázek 5. znázorňuje rovnovážný diagram $Cu - Zn$. Pájky, které mají méně než 60% mědi jsou levnější ale mají nižší teplotu tání a tvoří poměrně křehké spoje, protože struktura pájky se skládá z křehké fáze β . Kvalita mosazných pájek závisí na obsahu zinku, který má být nižší jak 40%. Zinek má nepříjemnou vlastnost tu, že má teplotu varu při teplotě $913^{\circ}C$, přitom při nižších teplotách dosahuje tlak nasycených par vysokých hodnot. Z toho plyne, že už při teplotě $650^{\circ}C$ můžeme pozorovat vypařování zinku. Toto vypařování společně s vodíkem způsobuje pórovitost spoje. Proto jsou nejlepší pájky na bázi $\alpha + \beta$ s přidavkem legujícího prvku jako jsou Sn , Si , Ag , Ni , Mn atd. Funkce těchto prvků je ta, že tvoří s prvky základního materiálu mezi slitiny s negativní schopností. Proto se uvolňuje množství tepelné energie a zlepšuje nám to smáčení. Cín naopak snižuje teplotu tání a zlepšuje tekutost dané pájky. [4]

Křemík, který je obsažen v malém množství okolo 0,1 až 0,25% zmenšuje pórovitost tím způsobem, že zmenšuje rozpustnost vodíku. Tvoří hybridy a to zabraňuje přepalu zinku. Křemík má tu vlastnost, že zároveň rozšiřuje oblast fáze β . Při obsahu více než 0,25% se při pájení oceli tvoří přechodová oblast s křehkou intermediální fází. Pájky bez Si nebo s velmi malým obsahem křemíku zabráníme vypálení zinku pomocí tavidla. Tavidlo musí mít vysokou viskozitu. Pokud bude mít tavidlo malou viskozitu bude to mít za následek velké odpařování Zn . Čím bude pájka mít bohatší fázi α tím bude menší pevnost daného spoje. Tohoto se využívá při nánosovém pájení. Jako příklad je pájení spoje typu V. Cín a křemík působí jako dezoxidační činitel pájky to zlepšuje mechanické vlastnosti. [4]

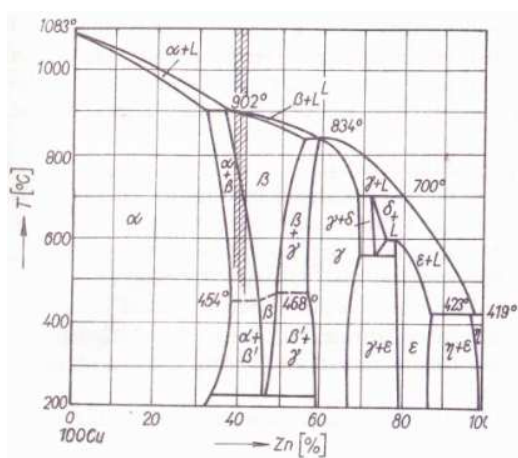
Tekutost podporuje stříbro a snižuje pracovní teplotu. U snížení pracovní teploty nedochází ke křehnutí pájky. Například Ag s obsahem 10% snižuje teplotu až o $200^{\circ}C$ ale zvýší se elektrická vodivost. Pevnost a houževnatost pájky zlepšuje nikl a nahrazuje v pájce Cu . Nikl však zvyšuje teplotu tání pájky. Pokud přidáme do pájky množství B nebo Li , můžeme pájku použít bez tavidla. [4]

Ostatní prvky například Al , Mg , Cd , nebo P při malém množství, tedy pod 0,01% působí křehkost spoje. Pb , Bi , Sb tyto prvky působí za tepla praskliny. [4]

Mosazné pájky mají dobré pájecí vlastnosti. Při okolní teplotě poskytují dobrou pevnost spoje. Mechanické vlastnosti kolísají v těchto rozmezích:

- pevnost v tahu (400 - 700 MPa),
- tažnost (20 - 40%),
- tvrdost (100 - 170HB).

Největší vliv na mechanické vlastnosti má prvek Cu neboli Zn, popř. poměr množství fáze α : β . Pokud nám roste fáze β potom se zvětšuje pevnost ale také se nám snižuje tažnost pájky. Jenom malá změna chemického složení pájky nám vyvolává velkou změnu mechanických vlastností pájky. Mosazné pájky můžeme použít u všech typů pájení kromě pájení ve vakuu a pájení v redukční atmosféře. U nánosového pájení se nejčastěji používá obalené pájky tavidlem. Nejdůležitější požadavek je dodržet předepsanou pájecí teplotu. [4]



Obr. 5 Rovnovážný diagram slitiny Cu - Zn

2.2 Vady při pájení

U hodnocení pájených spojů musíme vycházet z toho, že pájený spoj musí mít takové vlastnosti, jež jsou od něho vyžadovány. Přítomnost vad v pájeném spoji výrazně ovlivňuje užité vlastnosti spoje. V praxi nemůžeme dosáhnout dokonalého spoje bez vad. Jejich povolený rozsah bude různý podle požadavků, který klade provoz na pájený spoj. Přípustnost vad ve spoji závisí hlavně na typu spoje, typu a orientaci a velikosti vady, provozním namáhání, teplotě a prostředí.

Pro určení velikosti a rozsahu přípustné vady musíme zajistit vhodnou kontrolu spoje. Vady u pájených spojů můžeme zařadit do dvou hlavních skupin:

1. Plošné vady - jsou to například zbytky tavidla ve spoji, nesmáčená místa, trhliny apod.

2. Prostorové vady - jsou například póry, dutiny, krápníky, malý přechod pájky, nedokonalé vyplnění pájkou. [4]

Z hlediska mechanických vlastností pájeného spoje jsou více nebezpečny plošné vady. Tyto vady vyvolávají velkou koncentraci napětí. Prostorové vady nejsou tak nebezpečné, protože s určitým poloměrem zaoblení tvoří shluky. Abychom mohli minimalizovat množství vad v pájeném spoji je zapotřebí znát jejich příčinu vzniku. Vady pájeného spoje vznikají především nedodržením předepsaných podmínek z konstrukce spoje. Dále nevhodným zvolením kombinace přídavného a základního materiálu a také nedodržením technologických podmínek.

Nejčastější vady při pájení jsou:

- Křehké strukturní fáze,
- Rozpouštění základního materiálu,
- Horší smáčení pájky,
- Studený spoj,
- Přehřátí spojovacích materiálů,
- Zbytkové tavidlo ve spoji,
- Nesmáčená místa pájkou,
- Dutiny,
- Můstky nebo krápníky,
- Nedostatečné vyplnění spoje,
- Nedostatečná přechod pájky,
- Trhliny.

2.2.1 Charakteristika vad pájených spojů

Křehké strukturní fáze - značně snižují plastické vlastnosti a korozivzdorné vlastnosti spoje. Tyto fáze vznikají v pájce a přechodové oblasti spoje, když pájka obsahuje nečistoty nebo legury, které při krystalizaci vytvářejí intermediární nebo eutektické fáze. U pájení oceli tento důsledek mají prvky Al, P, Si, Bi, Pb, a Sb, které jsou obsaženy v pájce. Obsah těchto vyjmenovaných nečistot by měl být co nejmenší. Křehké strukturní fáze jsou ovlivněny i podmínkami pájení. Pájením s větší teplotou vzniká větší tloušťka intermediární fáze v přechodové oblasti spoje což výrazně ovlivňuje vlastnosti spoje, tehdy když dosáhne

kritické tloušťky. Doplnkovým žíháním nad teplotu tavení eutektických fází ve struktuře pájky můžeme strukturní fáze rozpustit a dosáhnout houževnaté jednofázové struktury pájky.

Rozpouštění základního materiálu v pájce závisí na chemickém složení pájky a základního materiálu ale také na podmínkách pájení. Rozpouštění základního materiálu je nevhodné pokud pájíme materiály o tenké tloušťce. Intenzita rozpouštění je menší při kratší době pájení, nižší teplotě a při použití pájky, která obsahuje prvky na bázi základního materiálu. Pájky cínové s menším obsahem Sn snižují rozpustnost základního materiálu.

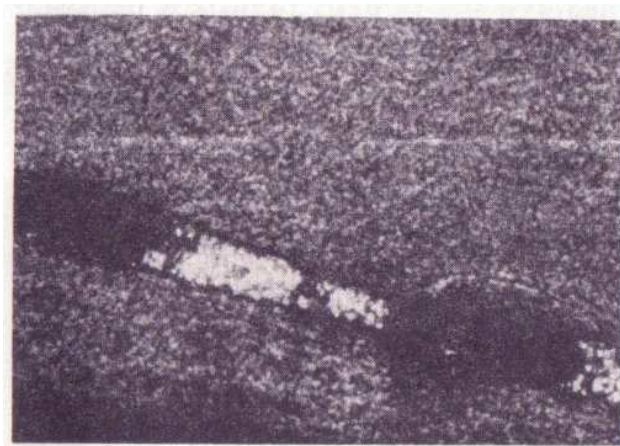
Horší smáčení pájky vznikají povrchové energie ve stykové oblasti mezi základním materiálem a roztavenou pájkou. Změna je způsobena metalurgickou reakcí vzniklou rozpouštěním základního materiálu a vzájemnou difuzí prvků základního materiálu a pájky. K odmačení dochází, pokud dojde k tomu, že nanesená vrstva se úplně roztaví, takže rozpuštěná pájka se dostane do styku s pájitelným základním materiálem. Tomuto jevu můžeme zabránit použitím dostatečné tloušťky pájené vrstvy.

Uvedené vady spojů závisí také na způsobu pájení, typu spoje, druhu základního materiálu a druhu pájky a tavidla[4].

Studený spoj vzniká tehdy, když je pájená plocha ohřátá na teplotu nižší než pájecí.

Přehřátí spojovaných materiálů má za příčinu vysoké pájecí teploty, které způsobí zhrubnutí zrna základního materiálu. Při ohřevu dochází ke vzniku velkého napětí nebo deformaci součásti ale také k trhlinám, které nejdou opravit. Vysoká teplota pájení nám také může způsobit, že nám vyteče pájka na opačný konec spoje, spálení tavidla nebo i některých prvků pájky.

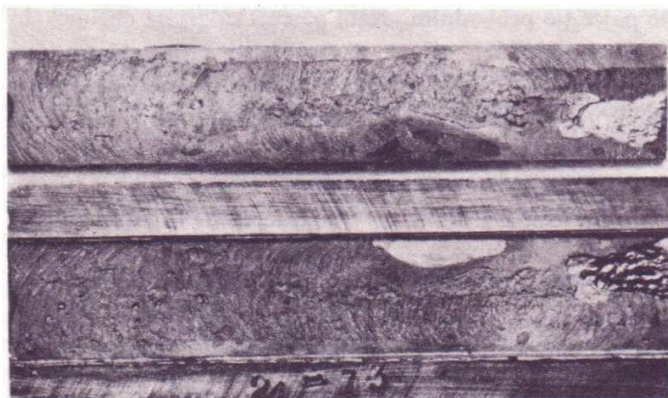
Zbytkové tavidlo ve spoji. Tento jev nastává pokud má tavidlo nedostatečnou reakční schopnost. Nebo také při malé mezeře spoje nebo při vysoké teplotě pájení.



Obr.6 Zbytky tavidla ve spoji[4]

Nesmáčená místa pájkou mohou vznikat důsledkem nevhodné pájecí teploty, neúčinným tavidlem ale také značně znečištěných míst povrchovými oxidy, které neodstraní tavidlo ani redukční atmosféra popř. vakuum.

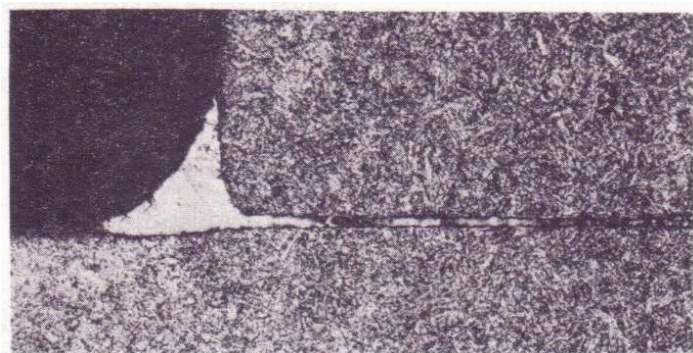
Dutiny, tato vada vzniká důsledkem smršťování. Tuhá pájka při ochlazování tuhne dříve na základním materiálu než ve středu pájky. Dutiny se objevují nejčastěji u V-spojů. Póry vznikají uzavřením plynu CO a H_2 . Kyslík brzdí roztékání pájky tak, že vytváří tekuté nebo tuhé oxidy. Při rychlém pájení a nízké pracovní teplotě bude pórovitost menší, než kdyby byla pájka přehřátá. K odstranění pórovitosti nám zabraňují i některé legující prvky například Si , který váže vodík. [4]



Obr.7 Póry v pájeném spoji[4]

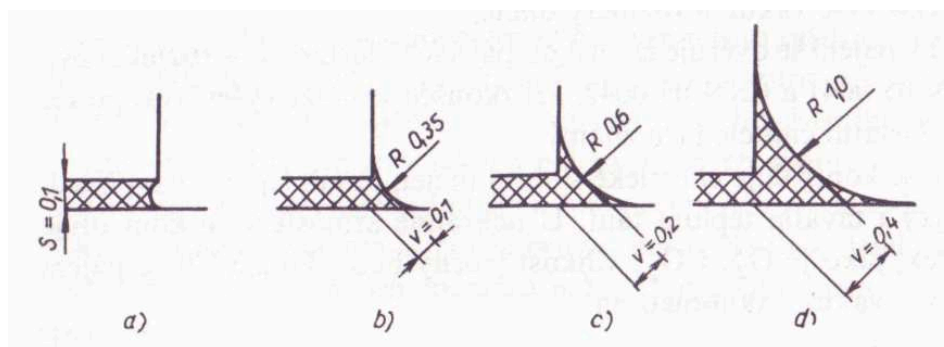
Můstky nebo krápníky se vyskytují u tištěných spojů, které jsou způsobeny přebytečnou pájkou a nevhodným přidáváním pájky do spoje. Krápníky mohou také vznikat při pájení měděných dílů mosaznou pájkou za vysokých pájecích teplot nebo při nevhodné mezeře spoje.

Nedostatečné vyplnění spoje. Vzniká pokud máme velmi malou mezeru nebo při krátké době pájení. Také nedostatečný spoj může vzniknout pokud do spoje vneseme nedostatečné množství pájky nebo pokud budeme pájet při nízké teplotě.



Obr. 8 Nedostatečné zatečení pájky do spoje[4]

Nedostatečný přechod pájky do spojovacího materiálu může být způsoben malou mezerou spoje, použitím nevhodné pájky nebo tavidla a také malým množstvím pájky. Jako vyhovující přechod pájky a spojení součástí, které jsou namáhány je poloměr nejméně 1mm. viz. obr.8. [4]



Obr. 9 Různé velikosti přechodů pájky u koutového spoje [4]

Trhliny vznikají především za rychlého ochlazování, jestliže pájka a spojovaný materiál mají rozdílný součinitel roztažnosti. Pokud zvolíme nesprávnou konstrukční úpravu spoje vznikne pak v důsledku vysoké koncentrace napětí trhlinka. Trhliny vznikají také za tepla i u houževnaté pájky se širokým intervalem teplot tavení ale také když je pájka ochlazena pod teplotou solidu, namáhána otřesem nebo nárazem.

Druh a počet vad bude určovat nejen pro pevnostní charakteristiky spoje jako je ohyb, odolnost proti nárazům a únavě, ale také pro odolnost proti korozi, těsnost a dobrou

elektrickou vodivost. Chybné spoje zhoršují povrchový vzhled výrobku a zdražují výrobu. Pouze některé chyby lze opravit ručním pájením. [4]

3. Indukční pájení

V technologii pájení je přibližně 75% veškerého pájení prováděné pomocí plamenného ohřevu. Přibližně dalších 15% je rozděleno do dalších dvou procesů, které popisujeme jako elektrické metody ohřevu. Tyto metody jsou indukce a odpor.

Obě metody ohřevu se vyznačují svou schopností poskytovat relativně rychlé a úzce lokalizovaný ohřev od oblasti spoje. Když je jejich užití vyhradí na procesy, kde se jejich vlastnosti využijí pro maximální efekt, budou dosažené vynikající výsledky. Navzdory čistému postupu obou procesů, je velmi důležité si uvědomit, že jejich pole použití pro pájení není zdaleka tak univerzální, jako plamenový ohřev. [5]

3.1 Indukční ohřev

Když je střídavý proud proudící ve vodiči, musí se střídavé magnetické pole vytvářet v jeho blízkosti. Je-li kus materiálu schopného indukující elektřinu umístěn v tomto magnetickém poli, bude vířivými proudy indukován v kusu materiálu. Vzhledem k tomu, že materiál má určitý stupeň rezistence k průchodu elektřiny, začne se zahřívat, podle pravidel Joulova zákona. V případě, že se materiál bude feromagnetický (např., železo, nikl, kobalt, a mnoho z jejich slitin), přídatné teplo bude výsledkem následků účinků magnetické hystereze. V důsledku toho, topný účinek indukovaného proudu může být reprezentován pomocí jednoduchého vzorce: [5]

$$Q = H \alpha I^2 R \quad (2)$$

Kde:

H - teplo indukované v obrobku

α - přímo úměrná

I - množství proudu indukovaného v obrobku

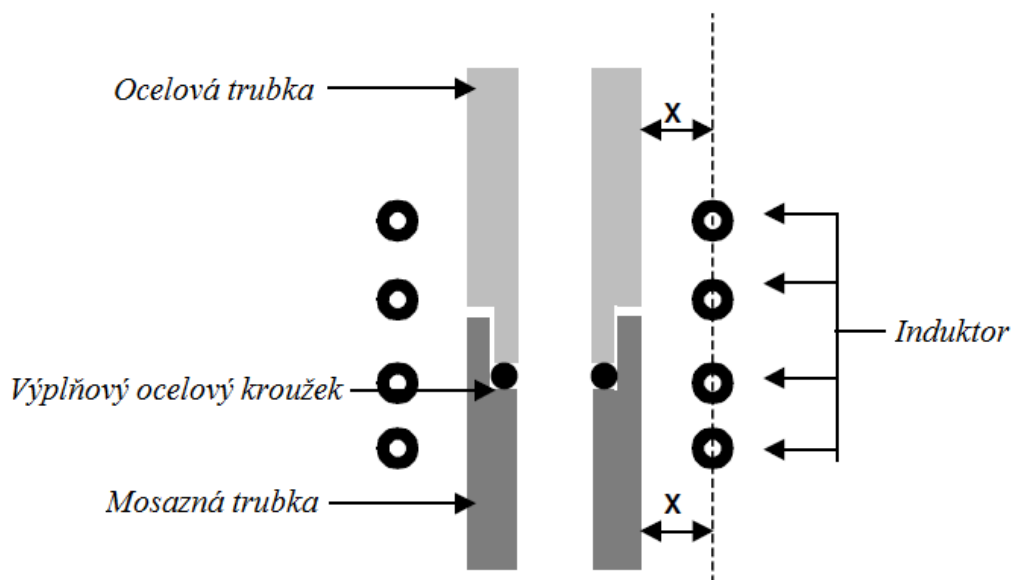
R - elektrický odpor obrobku

Je běžnou praxí uspořádat věci tak, aby během ohřevu za účelem indukčního pájení proud nesoucí induktor obklopoval oblast spoje. Navíc pokud je cívka umístěna tak, že je ve

stejně vzdálenosti od obou složek, které mají být indukovány v obou kusech. Existují-li takové podmínky základní rovnice může být přepsána takto:

$$C_o = H \alpha R \quad (3)$$

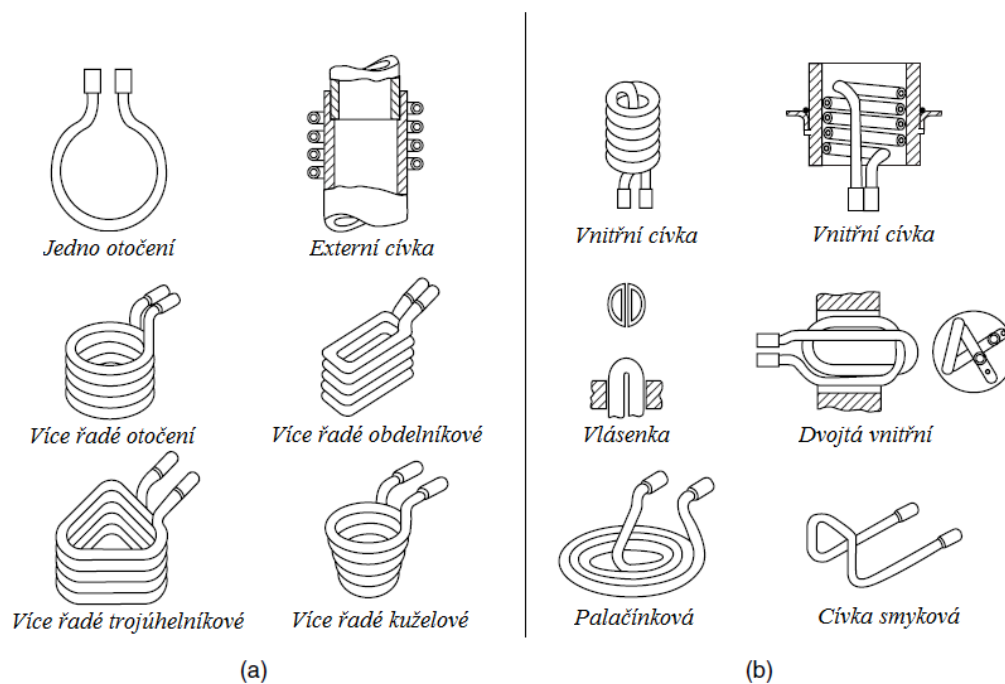
Z výše uvedených vzorců vyplývá, že automaticky v situaci znázorněné na obrázku 10, z materiálu, který má vysoký elektrický odpor (např., ocel) se ohřeje mnohem rychleji, než materiál, který má nízkou elektrickou odolnost, jako je měď, mosaz nebo hliník. To vysvětluje, proč pájení ocele s mosazí nebo s mědi indukací může být velmi problematické. Může to být provedeno bez jakýchkoliv pochybností, a později v této kapitole je vysvětleno, jak toho nejlépe dosáhnout. [5]



Obr. 10 Celkové uspořádání pro indukční ohřev[5]

3.1.1 Induktory

Ohřev výkonu indukce je přenášen na práci umístěním cívky blízko něj. Ve skutečnosti použití termínu induktor je lepší, protože jiné tvary než cívky jsou často činné. Obrázek 11 ukazuje několik forem induktorů, které jsou široce používány v indukční praxi. [5]



Obr. 11 Typický tvar induktorů používaných, když indukce je zdroj tepla pro:
 (a) vnější topení
 (b) vnitřního vytápění a rovné povrchy. [5]



Obr. 12 Účinnost vytápění v blízkosti induktoru[5]

3.1.2 Účinnost ohřevu

Umístění induktoru vzhledem k součásti, která se má ohřívat, je prvotním zřetelem pokud jde o účinnost vytápění. S odkazem na obrázek 12, může být snadno prokázáno, že:

1. Nejvyšší intenzita magnetického pole je generována uvnitř cívky -modrá oblast (a).
2. Pole střední intenzity je generováno, když interní cívka je používána - zelené plochy (b).
3. Magnetické pole nejmenší intenzity se vyrábí v rovině rovnoběžné s povrchem cívky -červené oblasti, (c).

V indukční tepelné technice, kde čím je větší intenzita magnetického pole, tím účinnější je jeho ohřevný výkon. To je výhodou pro použití cívky, která obklopují danou součást. [5]

3.1.3 Parametry ohřevu

V úvodních odstavcích této kapitoly je uváděn vliv v tom smyslu, že elektrický odpor má účinnost jako ohřev indukci. Existuje pět dalších faktorů, které je třeba vzít v úvahu, když je zkoumána celková účinnost ohřevu, která by mohla být zkušeností na konkrétním obrobku.

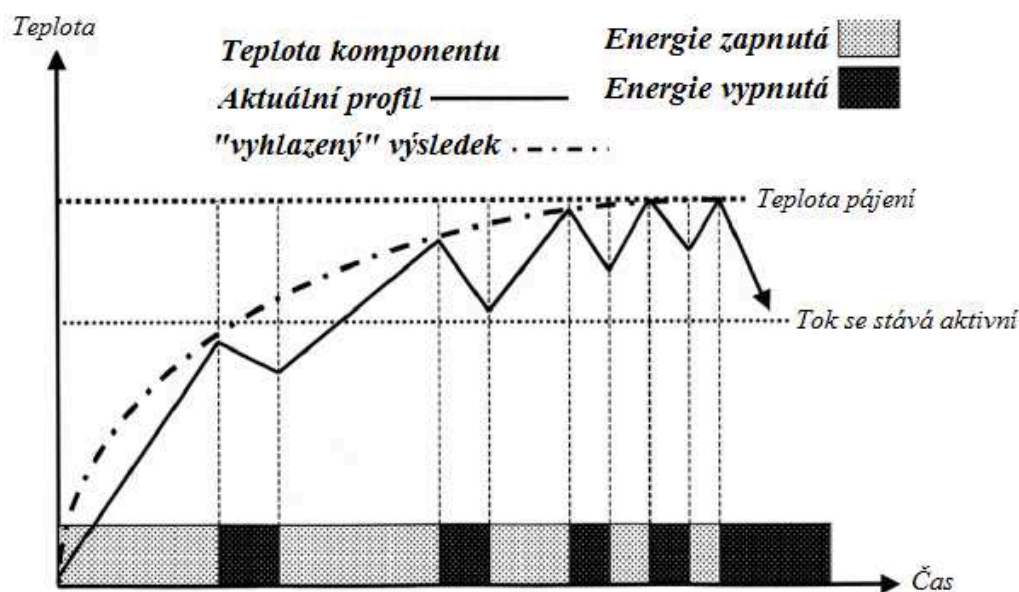
1. Tepelná vodivost materiálu.
2. Tepelná kapacita dílu
3. Vzdálenost práce z induktoru
4. Frekvence, při které generátor pracuje
5. Rychlost příkonu [5]

3.1.4 Vliv tepelné vodivosti

Je obecné pravidlo, že materiál, který má malou odolnost proti průchodu elektrického proudu (např. měď, mosaz a hliník) má tendenci se indukcí ohřát relativně pomalu. Tyto typy materiálu mají také obecně vynikající tepelnou vodivost. Teplo, má tendenci být relativně rychle odváděno od svého výrobního místa a do povrchu materiálu. [5]

V opačné situaci mají materiály vysokou odolnost proti průchodu elektrického proudu. Pokud se indukce použije jako zdroj tepla na materiály, které mohou být zahřívány velmi účinně (např., vysoce uhlíkové oceli), je velmi obtížné najít pro odvod tepla z místa výroby do komponentu. V těchto případech je vždy nebezpečí, že rychlost tepelného příkonu bude tak vysoká, že se povrch spálí, v extrémních podmínkách, ve skutečnosti začne tát. [5]

U starších modelů indukčního ohřevního zařízení se tyto potenciálně škodlivé účinky dají často vyloučit začleněním zařízení na ovládacím výstupu obvodu stroje, který automaticky a rychle přepne proud, který je přiváděn do cívky zapnutím a vypnutím při provozu vytápění. To má za následek poskytnutí doby pro ohřev, které byl vytvořen v průběhu období, ve kterém má být odváděno teplo do okolního materiálu během doby vypnutí. Tím se zajistí, že rychlost ohřevu byla plynulá, a předešlo se povrchovému popálení. Obrázek 13. ilustruje tento koncept. [5]



Obr. 13 Koncepce pulzujícího proudu[5]

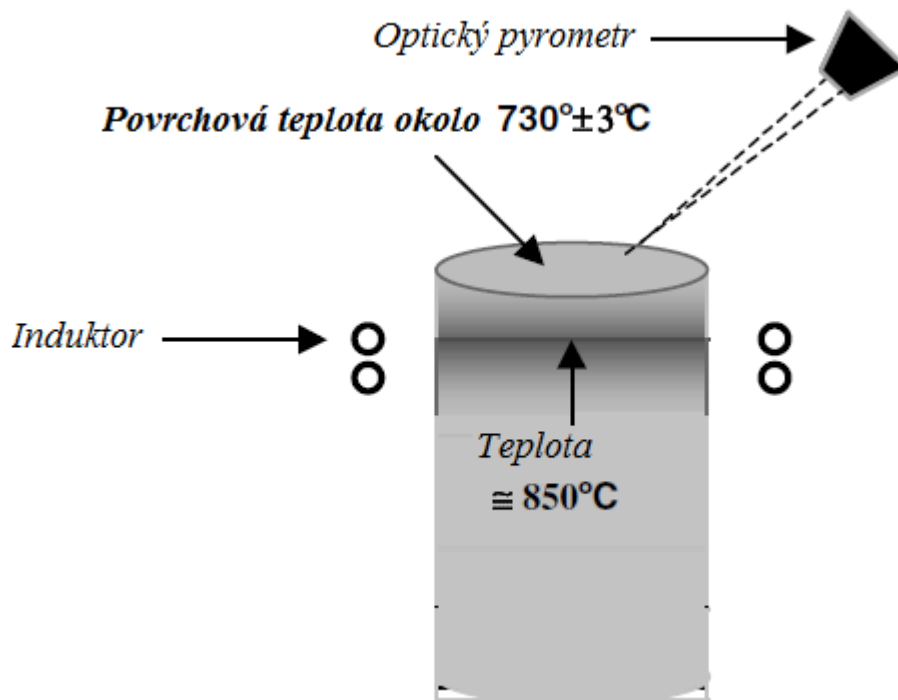
3.1.5 Vliv tepelné kapacity

Tento postup je všeobecně znám ze svařování v souvislosti s ohřevnými procesy aplikujícími elektrickou energii jako "pulzující proud". Ten má tendenci klesat. V indukčním ohřevu, se stále ještě poměrně značně používá v odporových svářecích postupech. U moderních polovodičových indukčních strojů je regulace teploty často dosaženo použitím optického pyrometru k dodávání informací o teplotě na napájecím zdroji generátoru.

Emisivita povrchu se může měnit z několika důvodů; jedním z důvodů je změna jeho teploty. Uvažujme případ, kdy je tavidlo bílé pasty nanášením na část povrchu. Pyrometr bude vidět bílou, a bílý povrch má vysokou emisivitu. Když se tavidlo taví vzniká čirá kapalina, emisivita povrchu se sníží, protože barva v pyrometru jde od bílé do barvy

základního materiálu, pokud je základní materiál ocelový, zahřátím může být až matně červený. Skutečnost, že na povrch, na který pyrometr hledí již není bílá, a proto je nižší emisivita, která může vést k problémům při řízení teploty. Je to proto, že právě v době, kdy by měl pyrometr podávat informaci generátoru, aby snížil sílu, protože teplota práce se blíží teplotě svařování. Systém, který je součástí pyrometr to kompenzuje tím, že dává signál generátoru, aby přidal více tepla (např. větší výkon). To může vést k poměrně závažným problémům přehřátí.

Často je pyrometr umístěn tak, že to vypadá jako svar a je kalibrován tak, aby jeho výstupní signál představoval určitou předem stanovenou teplotní hodnotu. Nastavená teplota je obvykle o několik stupňů vyšší než pracovní teplota slitiny pro svařování, která má být použita jako svar. Výkon obvod indukčního generátoru je řízen automaticky elektrickým výstupem z pyrometru. Výsledek této akce se pod kontrolou množství energie přivádí do induktoru, kde je postupně snížena teplota práce a blíží se nastavené teplotě. Celkovým efektem je velmi přesná regulace teploty v oblasti spoje. Ve skutečnosti to není neobvyklé, aby se zajistil kontrolní rozsah $\pm 3^{\circ}\text{C}$ typický pro přesnost, které může být běžně dosaženo. Zajímavým příkladem toho, jak může být tato technologie použita ve svařování se nachází v situacích, kdy jsou relativně malé kousky polykrystalických Diamond-(PCD)karbid wolframových hrotů připájeny ke stopce soustružnického nože. Aby nedošlo k tepelnému poškození PCD je nezbytné, aby teplota pájení byla omezena na přibližně 730°C . Jak lze vidět na obrázku 14, bez ohledu na to, jak dlouho sestava zůstává na horní ploše, přehřátí uhlíku válců práce nemůže nastat. [5]



Obr.14 Válec uhlíku zahřívá indukcí s regulací teploty poskytované prostřednictvím optického pyrometru[5]

3.1.6 Vliv vzdálenosti cívky

Vzdálenost cívky od práce je znám jako spojovací faktor a je velmi důležitý z hlediska účinnosti indukčního ohřevu. To může být snadno prokázáno, když vzdálenost mezi induktorem se zvyšuje a rychlost ohřevu klesá. Tento vztah je vyjádřen matematicky jako:

$$H \propto \frac{1}{d^2} \quad (4)$$

Kde:

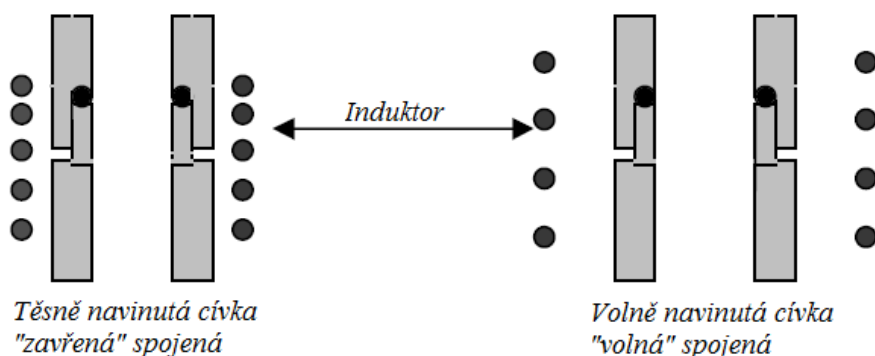
H = teplo generované v obrobku

α = Přímá úměra

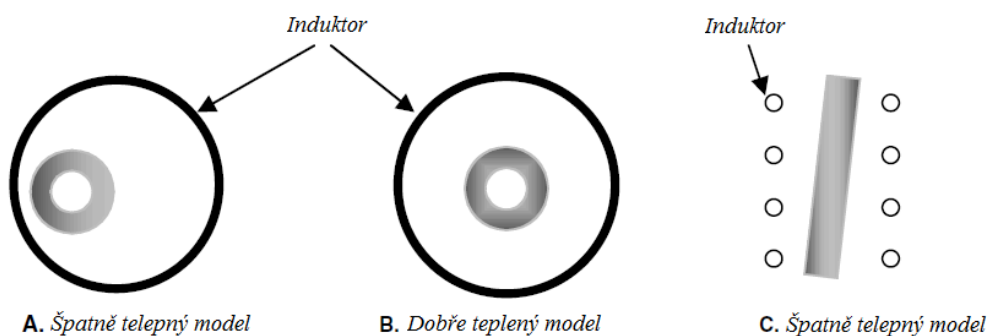
d = vzdálenost mezi obrobkem a induktorem

Z výše uvedeného jednoduchého vzorce, který klesá s druhou mocninou jasně upravuje topný účinek týkající se vzdálenosti od induktoru. To znamená, že když cívka, která je X mm pájeného předmětu se pohybuje tak, že se zvětší na $2X$ mm od pájeného

předmětu, rychlost zahřívání dosažené z nové pozice bude jen čtvrtina toho, co by převládalo na výchozí pozici. Platí to i naopak. V případě, že se vzdálenost mezi induktorem a prací sníží na polovinu, výsledek bude generovat čtyřikrát vyšší teplotu v nové pozici ve srovnání s množstvím vytvořené na staré pozici. Tato charakteristika indukční tepelné techniky zdůrazňuje ideální umístění cívky s ohledem na práci. Například, v případě, že induktor je příliš blízko k práci, je zde možnost, že během zahřívání tavidla pájením vznikne bublina. Kontaminace cívky tímto způsobem není užitečná pro celkovou účinnost procesu. Obrázek 16 znázorňuje koncepci jak volné a zavřené spojky. V širším smyslu, volné spojení je výhodné pro spařování. I tam, kde se používá volné spojení, induktor musí být dostatečně blízko ke spoji, aby bylo zajištěno, že je přijatelná rychlost ohřevu. Jak již bylo zmíněno, že maximální intenzita magnetického pole generována uvnitř cívky. Proto je část, která má být zahřívána musí být umístěna centrálně uvnitř cívky. V případě, že složka je „off-center“ v rámci role, že část, která je nejbližší k cívce vytápěna přednostně. To povede k tvorbě tepla, a v extrémních případech, dojde k lokalizovanému přehřátí složky v oblasti, která je přednostně zahřívá. Viz. obrázek 16. [5]



Obr. 15 Význam "volné" a "uzavřené" spojky[5]



Obr. 16 A) Pájený předmět není ve středu cívky B) Správně ustavený předmět C) Pájený předmět není rovnoběžně s induktorem [5]

3.1.7 Vliv frekvence

Je důležité si uvědomit, že hustota indukovaného proudu je největší na povrchu obrobku, a tím, že proudové hustoty se snižují, vzdálenosti od povrchu směrem ke středu komponentu se zvyšují. Tento jev je známý jako povrchový jev. Hodnota hloubky průniku je důležitým aspektem pro výrobu. Inženýr, který uvažuje o použití indukce, jako zdroj tepla pro pájení musí vědět, jak silný přístroj mít, a jakou výstupní frekvenci potřebuje mít, aby šlo teplo účinně do dílů. Hodnota hloubky penetrace, δ , lze vypočítat pomocí následující vzorce:

$$\delta = 500 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_p \cdot f}} \quad (5)$$

kde

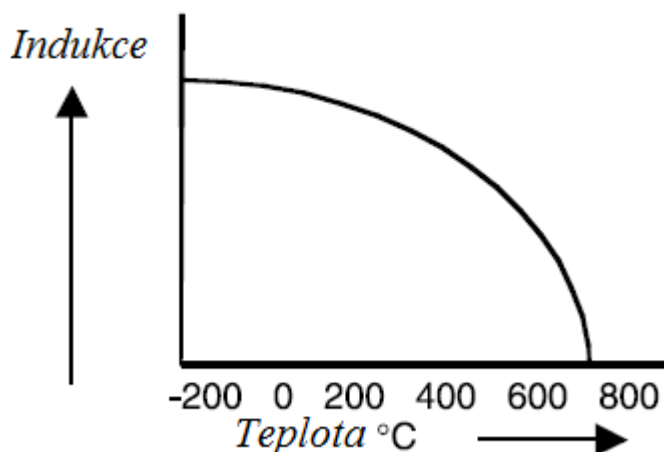
ρ = elektrický odpor materiálu

μ_p = relativní propustnost materiálu, který má být zahříván

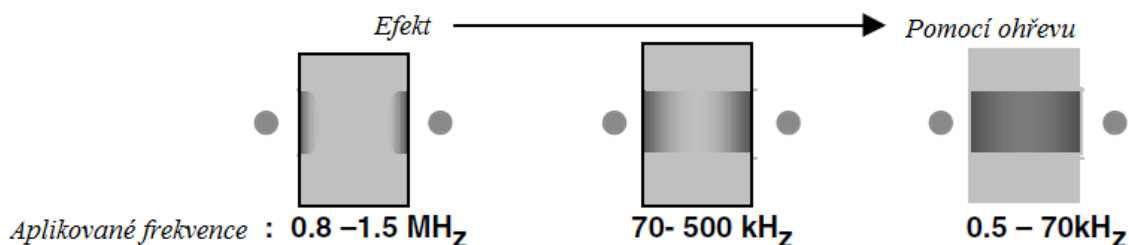
f = frekvence aplikované indukčního výkonu v Hertz

Pro nízké pájecí teploty, kde ocel musí být spojena a kde nebude dosažen Curie bod pro ocel (viz obrázek 17). Typické hodnoty pro μ_p budou v rozmezí 20 až 40. V případě, že ohřev bude nad Curie bodem, hodnota μ_p bude 1. Použití tohoto vzorce ukázalo, že frekvence střídavého proudu vzrůstá, hloubka pronikání indukovaného proudu klesá. Tento faktor může být rozhodující, pokud je třeba vybrat indukční generátor pro konkrétní aplikaci. Ty mají často velký průměr, možná 100mm nebo více, a je nutné, aby pájené spoje byly zahřívány až do jejich středu. Zařízení, které mají velmi nízké frekvence, typicky v rozmezí 0,5 až 70,0 kHz, obvykle splňují tento požadavek. Trubkové komponenty s tenkými stěnami se nejlépe zahřejí ve stroji, který má frekvenci v rozsahu 70 až 500 kHz. V případech, kdy snad je vyžadováno pouze „skin-efekt“ vytápění, kdy například je zapotřebí povrchové kalení materiálu, je pravděpodobné, že vybraný kmitočet leží v rozmezí od 0,8 do 1,5 MHz. Z toho vyplývá, že stroje, které mají kmitočty v tomto rozsahu, jsou nevhodné pro pájení. Praktický dopad těchto různých frekvenčních rozsahů je znázorněn na obrázku 18.

[5]



Obr.17 Snížení magnetické indukce s rostoucí teplotou[5]



Obr.18 Změna v hloubce s různými aplikovanými frekvencemi [5]

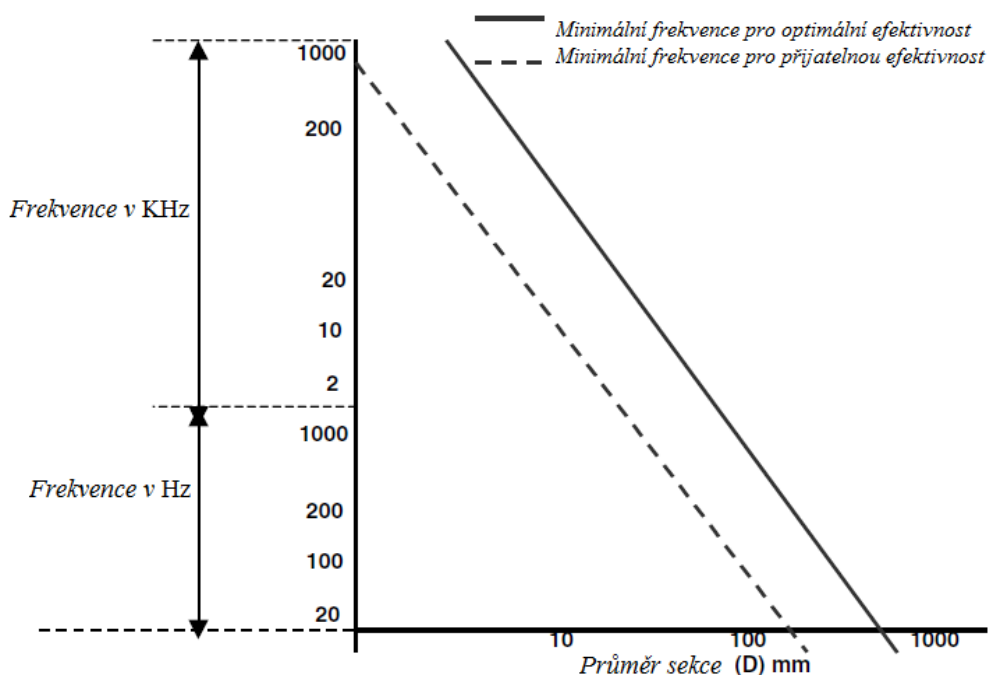
3.1.8 Vliv příkonu

Čím vyšší je výkon indukčního generátoru, tím větší bude intenzita magnetického pole, který se bude vyrábět v blízkosti induktoru. To bude mít výrazný vliv na rychlost ohřevu (za předpokladu, že induktor je udržován na jednotku délky ze všech částí díla). Za těchto podmínek teplota části vzroste v přímém poměru k nárůstu síly, která je přiváděna do induktoru. [5]

Volba frekvence má značný vliv na hloubku průniku indukční energie na práci. V důsledku, je zřejmé, že stroj schopný dodávat vysoký výkon při nízké frekvenci, aby bylo dosaženo požadované hloubky penetrace topného výkonu. Vztah mezi frekvencí a hloubkou pronikání indukčního výkonu, když nemagnetické ocelové profily jsou zahřívány, je znázorněno na obrázku 20. Tyto hodnoty se vztahují i na další vysokou odolnost materiálů, jako je nerezová ocel. V praxi, ideální frekvence odvozená z obrázku 19 nemusí být

nákladově nejefektivnější volbou. Z hlediska ekonomie, by nemělo být opomenuto, že stroj, který má výstupní frekvenci, která je nižší než ta, která je uvedena jako ideální, může umožnit generátor zakoupený za nižší náklady. Obrázek 20 poskytuje ukazatel na ideální situaci. [5]

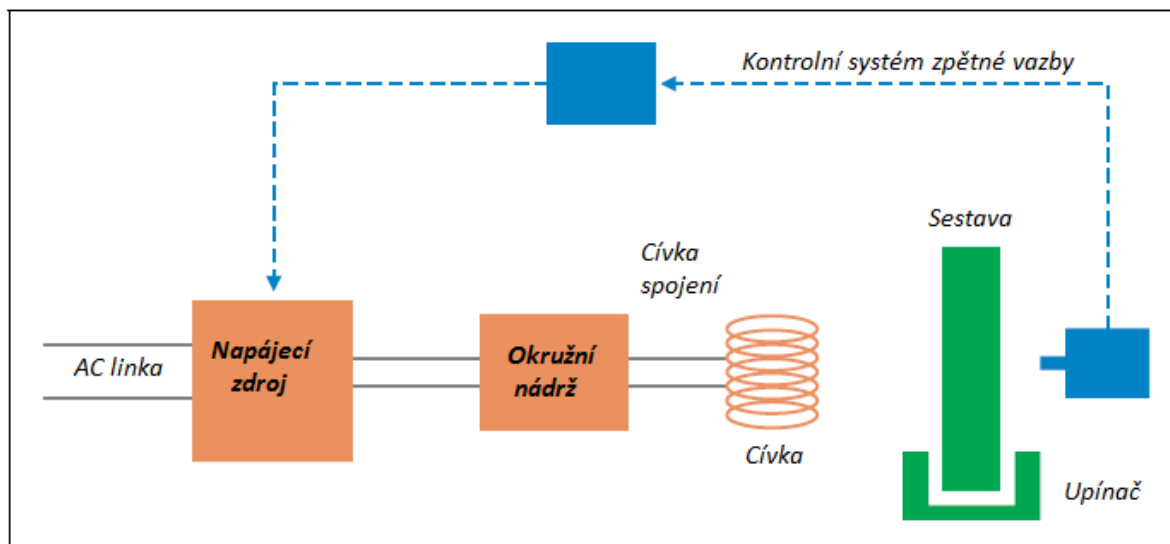
V kapitole 3.1.8 jsme viděli, že vysokou míru ohřevu, a to zejména v případě, že díly jsou vyrobeny z materiálů, které mají špatnou tepelnou vodivost, může vést k velmi závažným lokalizovaným přehřátím na povrchu a snad i k lokalizovanému tavení. [5]



Obr.19 Minimální frekvence pro optimální a přijatelný ohřev plným průřezem[5]

3.2 Zařízení pro indukční pájení

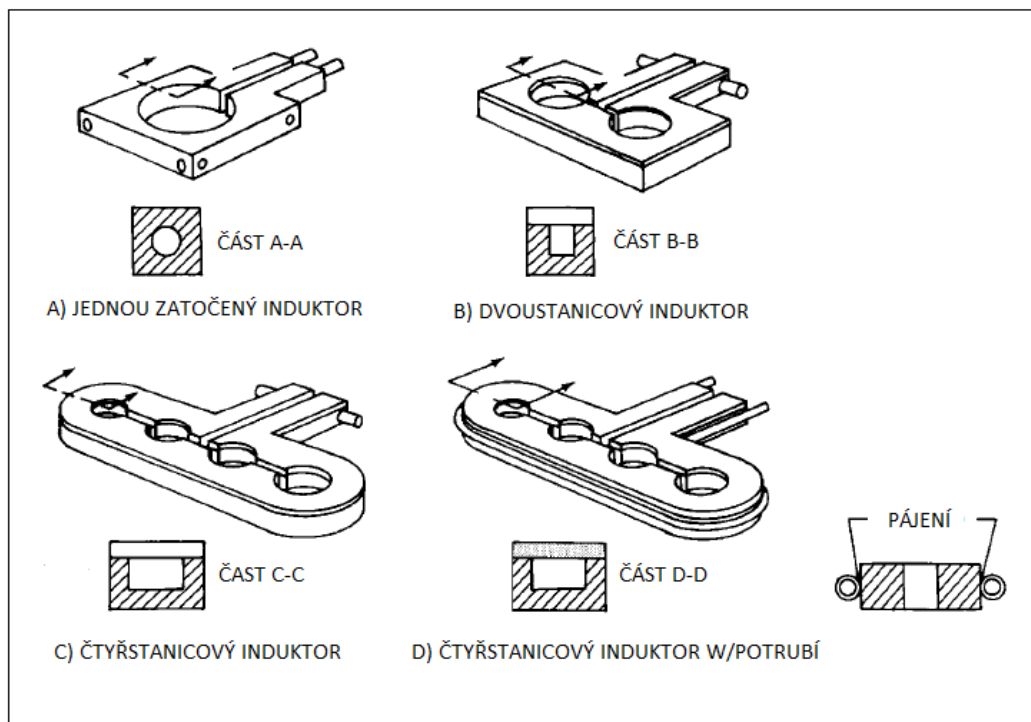
Úspěšné indukční pájení vyžaduje vhodný rozvod tepla do všech spojů. V první řadě závislá na konstrukci cívky, rychlost ohřevu, elektrická a tepelná vodivost. Kromě toho, úspěšné pájení závisí na volbě správné pájky a tavidla, pokud se používá. Primární komponenty indukčního systému je napájecí zdroj a indukční cívka nebo induktor. Případně, zpětná vazba teploty regulace mohou být přidány do systému. Tyto komponenty jsou popsány níže. Schematické znázornění typické systému pro indukční pájení je znázorněno na obrázku 20. [10]



Obr. 20 Schematické znázornění typického systému indukčního pro tvrdé pájení [10]

3.2.1 Chlazení pro indukční zařízení

Indukční systémy využívají chlazené vody pro cívky ve většině případů, napájení. Správně udržované vodní systémy jsou velmi důležité pro zajištění výkonu v sacím traktu. Důležité parametry zdroje vody jsou vodivost, tlak, teplota, průtok a cena. Vysoká vodivost vody bude skutečné teplo v indukční cívce. To může způsobit ztráty účinnosti a může mít nepříznivý dopad na proces a zařízení. Indukční systémy zahrnují vodoměr k zajištění provozní bezpečnosti a spolehlivosti stroje. Tyto průtokoměry nesmí být odpojeny, když je systém v provozu. Mohlo by dojít k ohrožení procesu, vybavení a obsluhy. [10]



Obr. 21 Induktory vyráběny z masivní mědi zhotoveny s vodním chlazením
 Uspořádání: A) Jedno zatočení, B) Dvoustanice C) Čtyřstanice D) Čtyřstanice s
 vnějším chlazením[10]

4. Charakteristika pájené součásti

Využití vysokolegovaných ocelí v dnešní době je velmi rozsáhlé. Jedna z oblastí je automobilový průmysl, kde se součásti z vysokolegovaných ocelí začínají používat čím dál častěji. Tato konkrétní trubka z vysokolegované oceli je nezbytnou součástí motoru V6 TDI, kde zaručuje správné odvětrání.

Při montáži jednotlivých dílů do celku můžeme použít různé metody spojování. Pro zvolení vhodné technologie ke spojení součásti závisí mnoho faktorů, jak z hlediska konstrukčního, ekonomického tak i z hlediska technologického. V úvahu také bereme z jakých materiálů je konstrukce vyrobena. Trubka z vysokolegované oceli s označením EN 10088 (X5CrNi18-10) je určena pro řešení problému indukčním pájením pro co nejlepší kvalitu spoje.

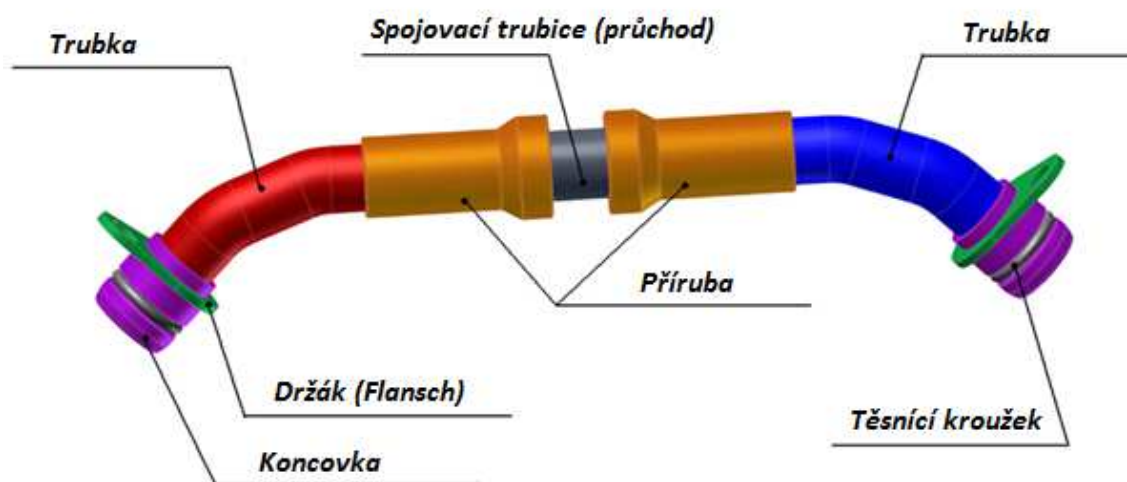


Obr. 22 Trubka z vysokolegované oceli pro odvětrání motoru V6 TDI

4.1 Materiály pájeného celku

Trubka z vysokolegované oceli, která se používá jako odvětrávací u motorů V6 Tdi GEN II EVO automobilky Audi. Tato trubka se skládá z pěti částí. Tyto části jsou k sobě přistěhovány a poté indukčně pájeny. první část je koncovka. Druhá část držák, trubka,

příruba a spojovací trubice (průchod). Ty samé části jsou zrcadlově otočeny. Dvě zhotovené části spojuje průduch. Kompletní dílec viz. obr. 23.



Obr.23 Kompletní dílec pájené trubky

Materiály pájeného celku jsou EN 10088 (X5CrNi18-10). Materiál držáku má jiné složení X8CrNiS18-9. Přídavný materiál je pájka z normy DIN EN 17672, která má měďný základ.

Tab. 2 Obsah prvků v materiálu **X5CrNi18-10** v % hmot[8]

Chemický prvek	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
[%]	<0,07	<1,00	<2,00	0,045	<0,015	<0,11	17,5 - 19,5	8,0 - 10,5

Tab.3 Údaje o fyzikálních vlastnostech austenitických ocelí odolných vůči korozi

Označení oceli		Hustota	Modul pružnosti v ...						Koeficient tepelné roztažnosti mezi 20°C a ...				
			MPa						$10^{-6} \cdot K^{-1}$				
Název	Číslo	Kg/dm ³	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
X5CrNi18-10	1.4301	7.9	200	194	186	173	172	165	16	16.5	17	17.5	18

Tab.4 Údaje o fyzikálních vlastnostech austenitických ocelí odolných vůči korozi

Označení oceli		Tepelná vodivost při 20°C	Měrná tepelná kapacita při 20°C	Elektrický odpor při 20°C
		$\frac{W}{m \cdot K}$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	$\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$
Název	Číslo			
X5CrNi18-10	1.4301	15	500	0,73

Tab. 5 Obsah prvků v materiálu X5CrNiS18-9 v % hmot[8]

Chemický prvek	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni	Cu
[%]	<0,10	<1,00	<2,00	0,045	0,15 - 0,35	<0,11	17,5 - 19,0	8,0 - 10,0	<1,00

Tab. 6 Údaje o fyzikálních vlastnostech austenitických ocelí odolných vůči korozi

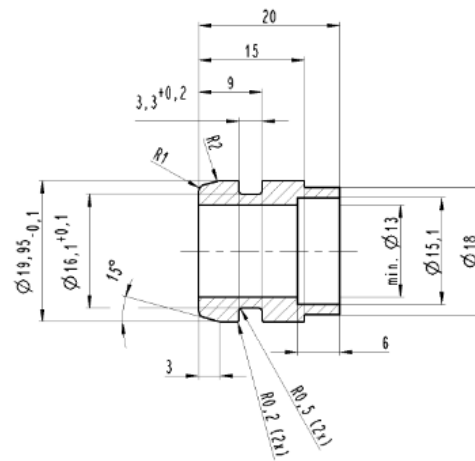
Označení oceli		Hustota	Modul pružnosti v ...						Koeficient tepelné roztažnosti mezi 20°C a ...				
			MPa						$10^{-6} \cdot K^{-1}$				
Název	Číslo	Kg/dm ³	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
X5CrNi18-10	1.4301	7.9	200	194	186	173	172	165	16	16.5	17	17.5	18

Tab. 7 Údaje o fyzikálních vlastnostech austenitických ocelí odolných vůči korozi

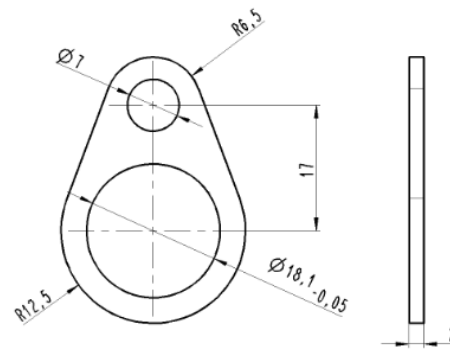
Označení oceli		Tepelná vodivost při 20°C	Měrná tepelná kapacita při 20°C	Elektrický odpor při 20°C
		$\frac{W}{m \cdot K}$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	$\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$
Název	Číslo			
X5CrNi18-10	1.4301	15	500	0,73

4.2 Jednotlivé části sestavy

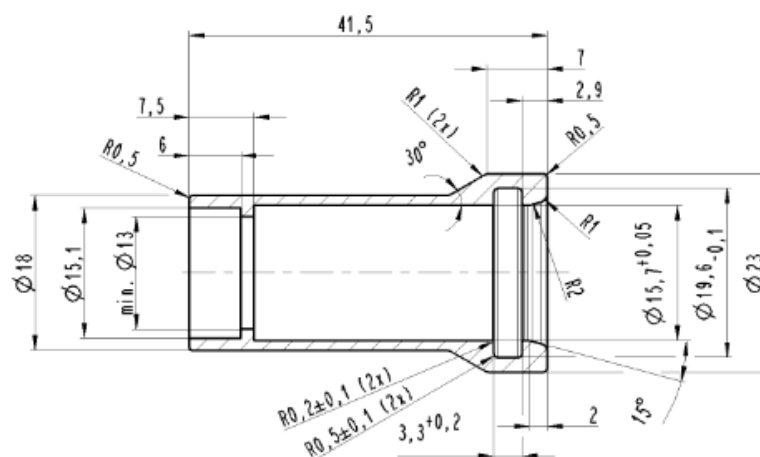
Jak už bylo řečeno v kapitole 4.1 trubka se skládá z 11 částí a to jsou 2x těsnící kroužek, 2x koncovka, 2x trubka, spojovací trubice, 2x držák, 2x příruba. Na obrázcích 24 až 28 jsou znázorněny jednotlivé části. Kompletní výkresy sestavy z vysokolegované oceli jsou v příloze.



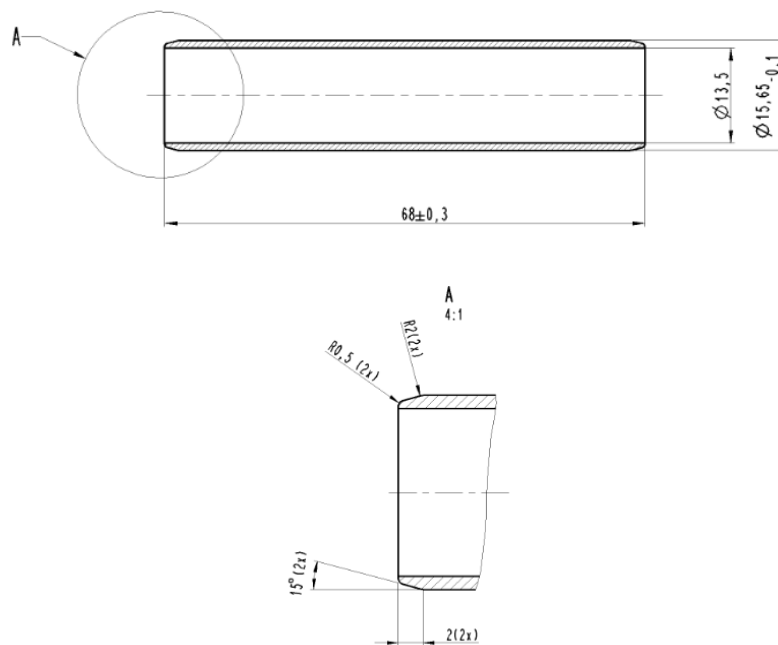
Obr. 24 Koncovka



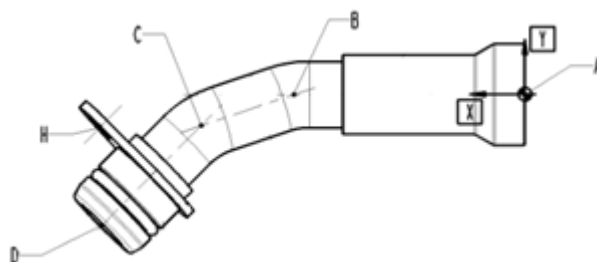
Obr. 25 Držák



Obr. 26 Příruba



Obr.27 Spojovací trubice



Obr. 28 Trubka

5. Návrh a ověření vlastností indukčně pájených spojů

Návrh nové technologie proběhl zároveň s návrhem zařízení pro indukční pájení. Optimální technologie vychází z předešlého pájení podobných komponentů. Kroky, při návrhu technologie:

1. Druh materiálu, který budeme indukčně pájet.
2. Pájka a tavidlo, které se budou při indukčním pájení používat.
3. Parametry pájení.
4. Vhodné přípravky.

5.1 Stávající technologie - pájení v pecích

Postup při výrobě odvodušňovací trubky z vysokolegované oceli:

1. Výroba komponentů (držák, příruba, koncovka, spojovací trubice, trubka) .
2. Stehovat v přípravku.
3. Očistit sváry.
4. Odmastit.
5. Pájet v peci.
6. Kontrola tvaru.
7. Značit.
8. Odmastit.

Technologie pájení v pecích se ukázala jako nevyhovující. Problémem bylo, že pájené kusy se v pecích deformovaly a pájka nezatekla rovnoměrně do pájeného spoje. To mělo vliv při kontrole tvaru, kdy trubky nešly nasadit do přípravku a také bylo mnoho zmetků z důvodu špatně zapájeného spoje. Návrhem indukčního pájení, kdy pájíme pouze určité místo by se mělo předejít vadám špatného zapájení a deformaci. To má za následek i vhodně zvolit zařízení pro indukční pájení vysokolegovaných trubek pro motory V6 TDI.

5.2 Návrh spoje pro pájený materiál

Spoje pájených součástí jsou dány konstrukčním výkresem, který byl vytvořen konstruktérem. Na základě konstruktéra se volí základní materiály a také se navrhuje vhodné přípravky. Návrhy pájených spojů se řídí podle:

1. Volba vhodných materiálů, které vzájemně vytvoří spoj.
2. Efektivní postavení základního materiálu ve spoji.
3. Správné zvolení typu pájky pro vytvoření ideálního spoje.
4. Správně zvolená metoda pro vytvoření kvalitního spoje.

5.3 Návrh pájky a tavidla pro indukční pájení

Na žádost zákazníka se musela použít pájka na bázi mědi podle normy DIN EN ISO 17672. Po předchozích zkušenostech se použila pájka s označením Cu21. Tato pájka je označována jako pájka s vysokým obsahem mědi. Obsah mědi je 99,9%.

Tab. 8 Obsah prvků v pájce Cu21

Chemický prvek	Cu	Sn	Ag	Ni	P	Bi	Al	Doprovodné prvky
[%]	99,9	-	-	-	-	-	-	<0,1

Kvůli velkému počtu pájených spojů je spoj vyráběn ruční aplikací. Tímto faktorem vzniká velké množství nevyhovujících dílů. V projektu motorů V6 TDI se pájka aplikovala ručně. Pájka byla umístěna do spoje, kde dosáhneme nejvyšší teploty pájení, tedy i induktoru. Tímto způsobem se zajistilo, že pájka vlivem roztavení a gravitace vtekla do požadovaného spoje.

5.4 Aplikace ohřevu pájení

Jako nejvhodnější typ ohřevu pro pájené trubky z vysokolegované oceli byl zvolen ohřev induktorem. Při použití celobjemového pájení v pecích díly vykazovaly deformaci a nedostatečné zatečení pájky do spoje. To mělo na následek vadný spoj a tvar trubky.

5.5 Volba zařízení pro indukční pájení

Jako nejvhodnější zařízení pro indukční pájení nerezových dílů podle firmy EFD Induction bylo doporučeno zařízení s označením SINAC 06/10 SM. Technické parametry jsou znázorněny v tabulce č.9. U tohoto zařízení si výkon mohou nastavit operátoři na panelu nebo pomocí externí řídicí jednotky. Jedná se o moderní víceúčelovou indukční jednotku, která je schopná splnit širokou škálu topných úkonů pájení, předehřívání apod. Zařízení má také chladicí jednotku. Firma ZKL Hanušovice s ohledem na počet pájených spojů musela zakoupit více těchto zařízení. Obsluha zařízení SINAC 06/10 SM je velmi jednoduchá. Vše je předem nastaveno a obsluha vykonává pouze úkon upnutí do přípravku a následné pájení.



Obr. 29 Pájecí zařízení SINAC 06/10 SM[9]

Tab. č.9 Technické parametry indukčního zařízení SINAC 06/10 SM[9]

model	Sinac 6/10 SM		
výkon		chlazení	
Trvalý výstupní výkon	6 kW	Spotřeba vody, min.	7 l / min *
Max. výstupní výkon přerušovaný	10 kW	Vstupní teplota vody	max. 35 °C
Duty factor / doba cyklu	50% / 10 min	Tlak vody min. / Max.	4/6 bar *
Výstupní regulace výkonu rozsah	2-100%	Chladicí kvality vody - pH	mezi 7,0 a 9,0
Frekvenční rozsah	10-25 kHz	příloha	
HHT 240 napájecí délka kabelu	5 m (10 m)	Okolní provozní teplota.	5°C -+ 50°C
dodávka		Vnější rozměry skříně (Š x H x)	600 x 350 x 760 mm
Rozsah napájecího napětí	3 x 400 až 480 V + 10%	Hmotnost s HHT 240 cca.	90kg
frekvence	50/60 Hz	krytí	IP 54
Jmenovité napětí	400 V	barva	RAL 7035 Grey
Jmenovitý síťový proud	11 A (RMS)	HHT 240 vnější rozměr (L x OD)	132 x 77 mm
Max. síťový proud přerušovaný	17 A (RMS)	HHT 240 Hmotnost bez rukojeti	3,5 kg
Jmenovitý zdánlivý výkon	8 kVA		
Maximální zdánlivý výkon	12 kVA		
Doporučená pojistka	16 Amp		

5.6 Příprava odvodušňovací trubky před indukčním pájením

Necháme vyrobit komponenty pájené trubky. Jako první odebereme koncovku, která se vloží do díry přípravku. Dále držák, který se nasune na koncovku v přípravku. Mezi držák a koncovku se vloží planžeta dle obrázku 30. Planžeta nám při pájení zaručí správnou mezeru, tak aby pájka zatekla do místa spoje. Nasadit na čep a zajistit. Vezmeme trubičku a správnou stranou bez značky nasunout do malé koncovky dle obrázku 31.



Obr. 30 Správně založená planžeta mezi držákem a koncovkou



Obr. 31 Správné nasazení trubičky do koncovky

Dále vzít spojovací díl, který se nasadí na čep přípravku a nasunout na trubičku. Viz. obrázek 32. Následně zajistit a zkontrolovat správnost založení componentů v přípravku. Proveďte se úkon stehování svářečkou Transsteel 3500C.



Obr. 32 Správné založení komponentů před stehováním

Po ukončení úkonu stehování se trubky vytáhnou z přípravku a vloží do odmašťovacího koše. Trubky se odmastí. Po odmaštění by trubky měly být bez oleje, chladicí emulze a jiných nečistot.

Odmašťování se provádí na přístroji Atoll 800 od firmy Summa. Parametry odmaštění jsou znázorněny v tabulce 10. Výměna odmašťovací lázně se provádí 1 za 30 dní nebo podle měření vodivosti. Minimální hodnota vodivosti je 9,5mS a maximální hodnota je 15mS. pH 10,5 -1. Kontrola koncentrace lázně se provádí jednou denně.

Tab.10 Parametry pro odmaštění

Příprava odmašťovací lázně	35l koncentrátu + voda
Celková pracovní náplň	600l + 120l
Prostředek	Star MDN
Koncentrace	5%
Teplota	do 60°C

Po odmaštění se provádí oplach vodou. Parametry oplachu jsou znázorněny v tab. 11. Výměna oplachové lázně se provádí 1 za 30 dní nebo výsledku měření vodivosti. Maximální hodnota je 6mS. 7 pH maximálně.

Tab.11 Parametry pro oplach

Pracovní náplň	600l
Teplota	do 60°C

5.7 Indukční pájení trubky z vysokolegované oceli

Provedení experimentu pájení trubky z vysokolegované oceli bylo uskutečněno pájecím zařízením, kde proběhlo několik experimentů s indukčním pájením dílů.

Požadavek experimentu byl, aby bylo dosaženo vyhovujících pájených spojů tj. kvalita pájeného spoje, které se následně vyhodnocovaly podle normy ČSN EN ISO 18279. Mechanické a chemické vlastnosti základních materiálů viz tab. 1 až 6. Experiment se prováděl na pájecím zařízení SINAC 6-10 SM na principu indukčního ohřevu. Tavidlo zde nebylo zapotřebí použít kvalita spoje byla vyhovující i bez použití tavidla. Před samotným experimentem byla pájená trubka připravena dle kapitoly 5.6.

5.7.1 Zkoušky provedené indukčním pájením

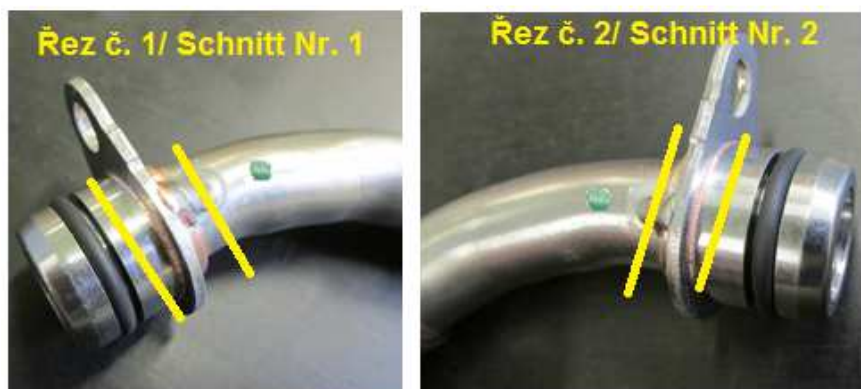
Během experimentu bylo provedeno několik zkoušek pájeného dílce, kde jednotlivé zkoušky proběhly v Norsku a ZKL Hanušovice a.s. Cílem bylo dosáhnout takových parametrů indukčního pájení aby vznikl co nejkvalitnější spoj. K dosažení vyhovující kvality spoje bylo zapotřebí zajistit geometrii kruhovitosti trubky v místě pájení. Provést úpravu hran spoje tak, aby pájka měla vždy stejnou polohu a zatékala rovnoměrně. Mezi faktory, které ovlivňovaly celkový výsledek pájení bylo zajistit při stehování v přípravku vždy stejnou mezeru spoje pro následné indukční pájení, volba vhodného zařízení pro indukční pájení, volba tvaru induktoru, volba parametru při indukčním pájení. Pájky se v případě indukčního pájení aplikovaly ručně do spoje. V tabulce č.10 jsou zaznamenány jednotlivé zkoušky a jejich výsledky. Obrázky 35 až 44 znázorňují výsledky makrostruktury.

Zkoušky prováděla Norská firma EFD Induction viz obr. 33. Následně zkoušky byly zhotoveny ve firmě ZKL Hanušovice, kde se zkoušelo indukční pájení. Šlo o kvalitu spoje a vzhled.



Obr. 33 Indukční pájení ve firmě EFD Induction

Tyto experimenty byly vyhodnocovány v laboratoři ZKL Hanušovice. Prováděly se destruktivní zkoušky. Byly zhotoveny podélné a příčné řezy viz. obr. 34.

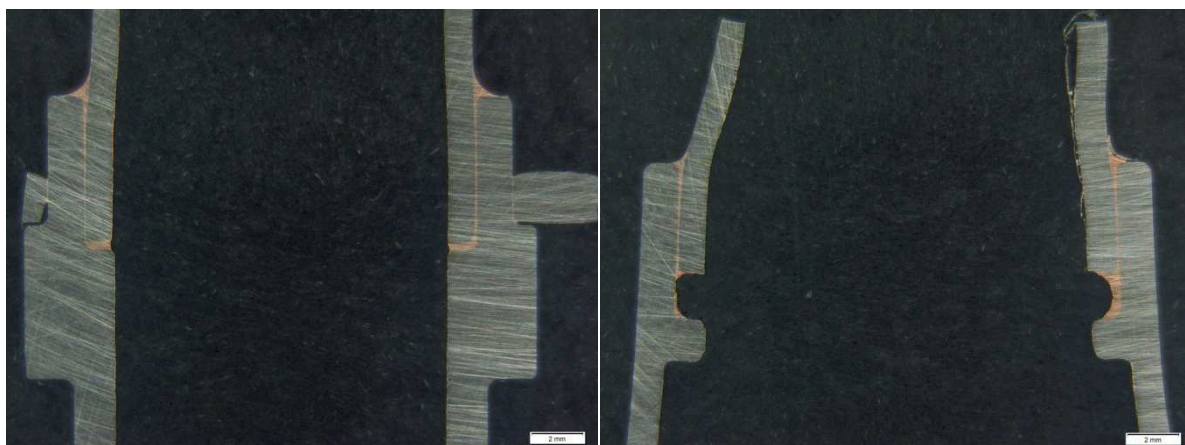


Obr. 34 Naznačení řezu vzorku

Bylo zhotoveno 10 trubek, které se indukčně pájely. Prováděly se příčné a podélné řezy jak mezi úchytem a koncovkou tak i mezi trubkou a spojovací trubicí. výsledky jsou znázorněny v tabulce č.10 a 11.

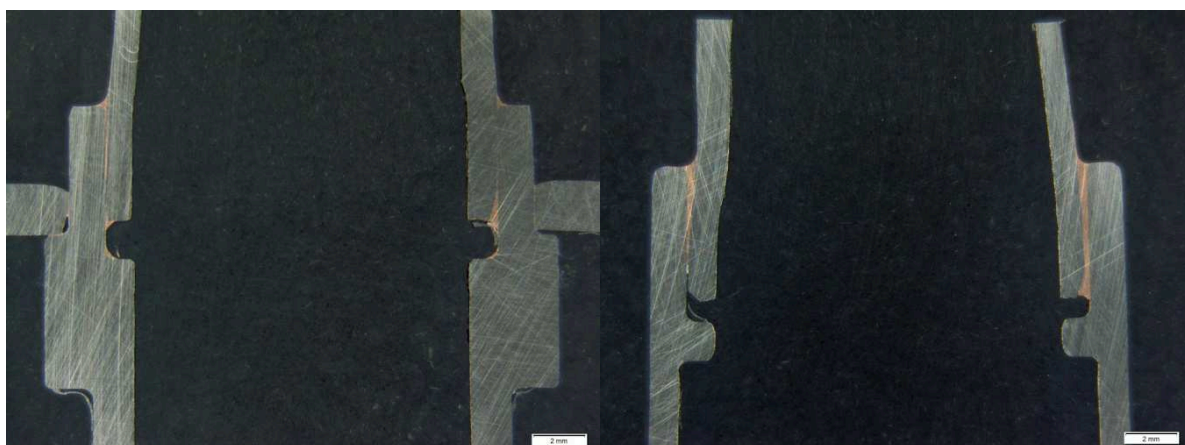
V ZKL Hanušovice a.s, bylo zhotoveno 10 trubek (vzorků), které byly indukčně pájeny. Pro indukční pájení bylo vybráno zařízení SINAC 06/10 SM, které nám na základě dlouholetých zkušeností navrhla Norská firma EFD Induction. U všech deseti vzorků byly provedeny destruktivní zkoušky.

Na obrázku 35. byl zhotoven podélný řez mezi přírubou, trubicí a koncovkou. V % zapájené plochy byl výsledek mezi přírubou a trubicí 100%. Mezi držákem a koncovkou 75,9% a mezi koncovkou a trubicí 100%.



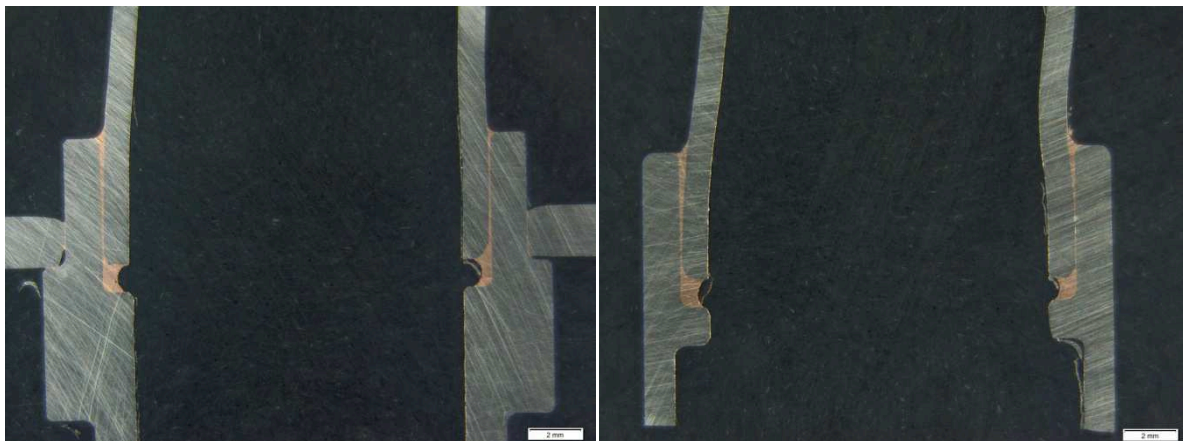
Obr.35 Makrostruktura pájeného spoje. podélný řez - trubka č.1

Na obrázku 36. bylo zhotoven podélný řez stejně jako u obrázku č.30. V % zapájené plochy byl výsledek mezi přírubou a trubicí 81,1%. Mezi držákem a koncovkou 80,1% a mezi koncovkou a trubicí 85,6%.



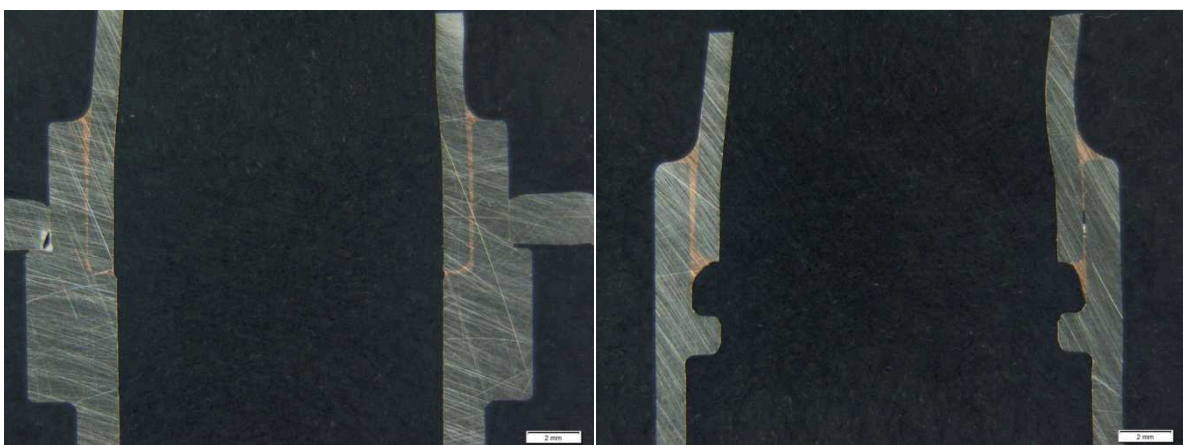
Obr.36 Makrostruktura pájeného spoje. podélný řez - trubka č.2

Na obrázku 37. bylo zhotoven podélný řez. V % zapájené plochy byl výsledek mezi přírubou a trubicí 100%. Mezi držákem a koncovkou 81,3% a mezi koncovkou a trubicí 94,2%.



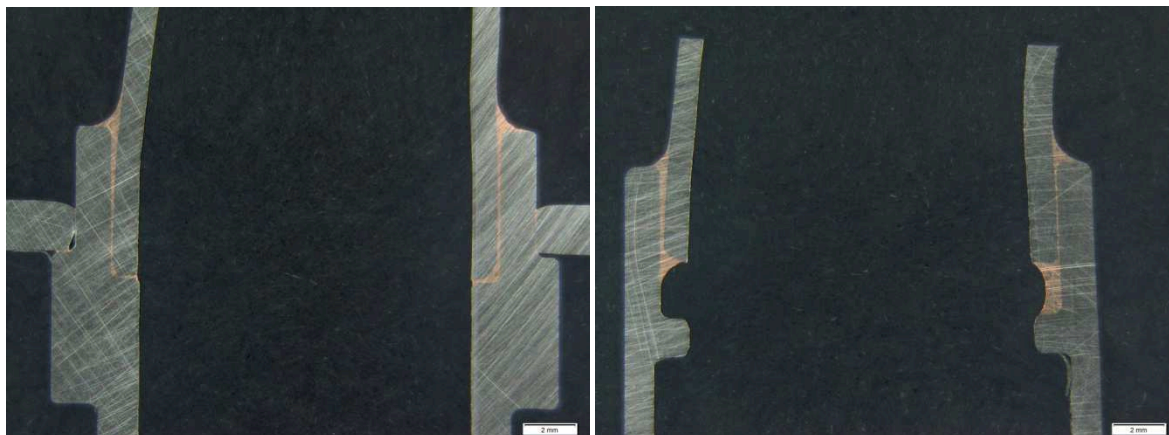
Obr.37 Makrostruktura pájeného spoje. podélný řez - trubka č.3

Obrázek 38. v % zapájené plochy byl výsledek mezi přírubou a trubicí 100%. Mezi držákem a koncovkou 80,3% a mezi koncovkou a trubicí 86,6%.



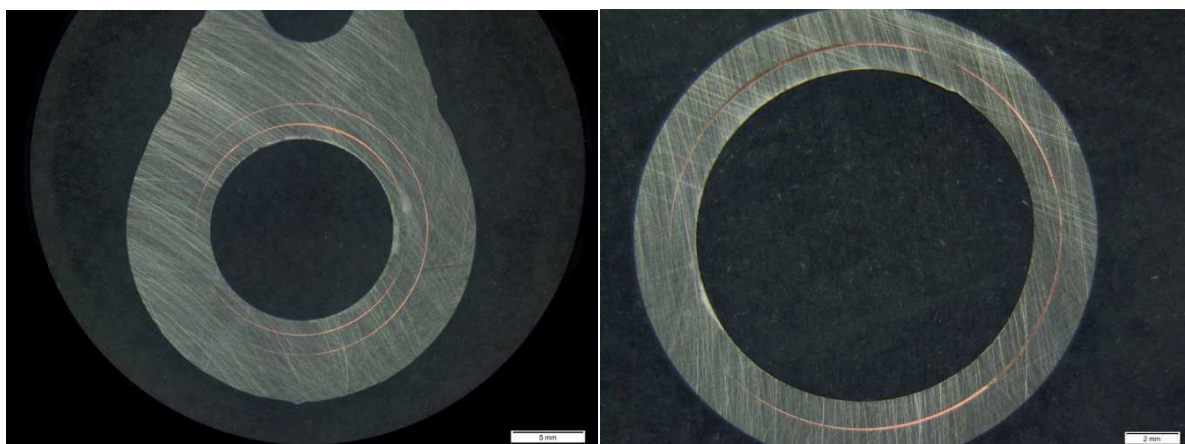
Obr.38 Makrostruktura pájeného spoje. podélný řez - trubka č.4

Na obrázku 39. bylo zhotoven podélný řez. V % zapájené plochy byl výsledek mezi přírubou a trubicí 100%. Mezi držákem a koncovkou 79,8% a mezi koncovkou a trubicí 100%.



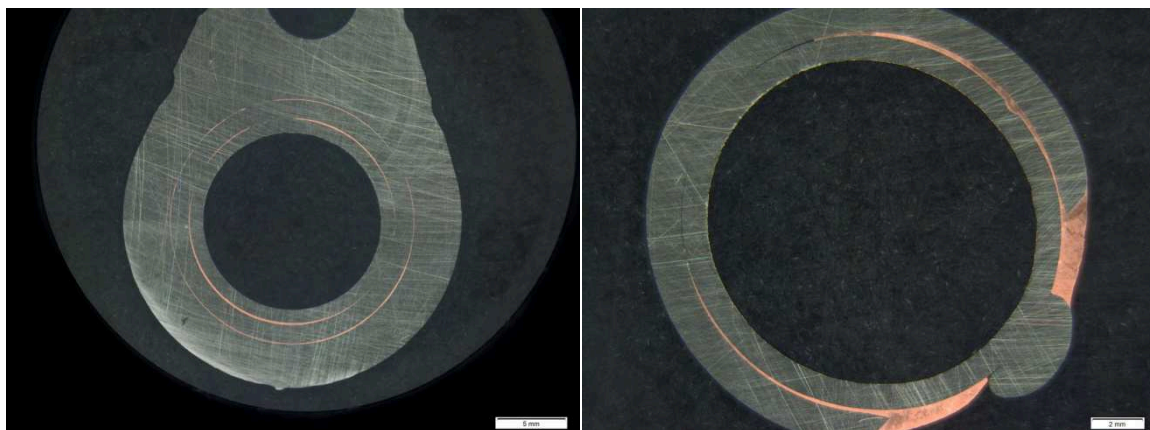
Obr.39 Makrostruktura pájeného spoje. podélný řez - trubka č.5

Na obrázku 40. bylo zhotoven příčný řez. V % zapájené plochy byl výsledek mezi přírubou a trubicí 82,8%. Mezi držákem a koncovkou 87,3% a mezi koncovkou a trubicí 86,8%.



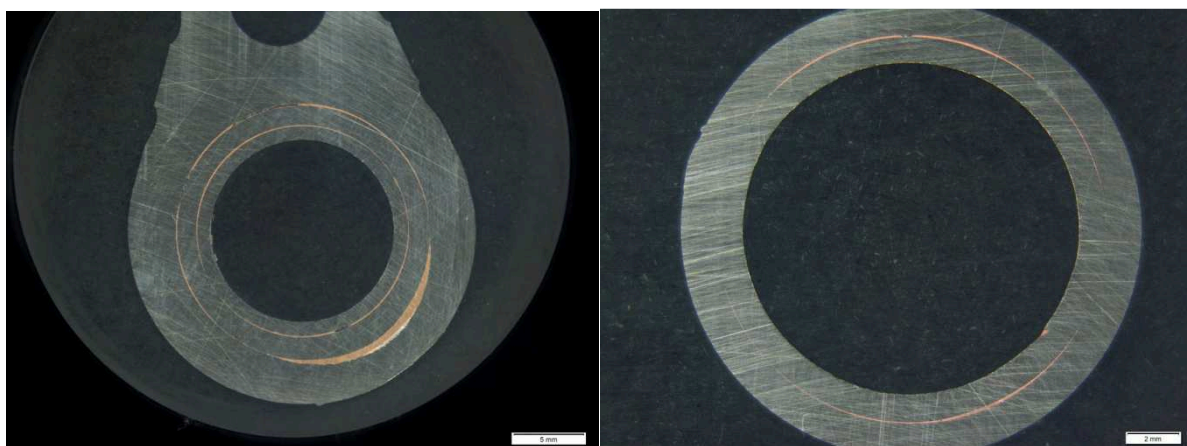
Obr.40 Makrostruktura pájeného spoje. příčný řez - trubka č.6

Na obrázku 41. bylo zhotoven příčný řez stejně jako u obrázku 35. V % zapájené plochy byl výsledek mezi přírubou a trubicí 81,6%. Mezi držákem a koncovkou 89,8% a mezi koncovkou a trubicí 83,5%.



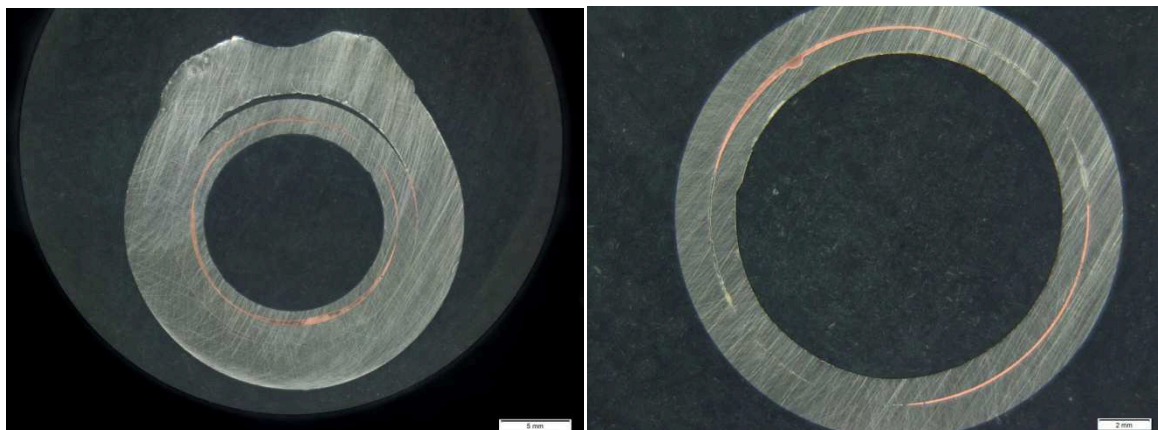
Obr.41 Makrostruktura pájeného spoje. příčný řez - trubka č.7

Na obrázku 42. bylo zhotoven příčný řez. V % zapájené plochy byl výsledek mezi přírubou a trubicí 93,7%. Mezi držákem a koncovkou 85,8% a mezi koncovkou a trubicí 79,9%.



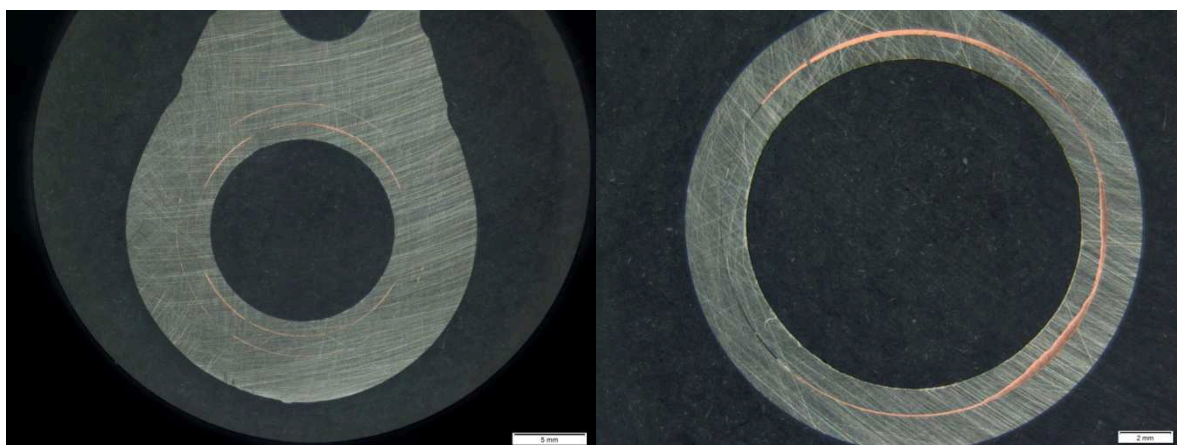
Obr.42 Makrostruktura pájeného spoje. příčný řez - trubka č.8

Na obrázku 43. bylo zhotoven příčný řez. V % zapájené plochy byl výsledek mezi přírubou a trubicí 96,1%. Mezi držákem a koncovkou 68,9% a mezi koncovkou a trubicí 75,7%.



Obr.43 Makrostruktura pájeného spoje. příčný řez - trubka č.9

Na obrázku 44. bylo zhotoven příčný řez. V % zapájené plochy byl výsledek mezi přírubou a trubicí 82,9%. Mezi držákem a koncovkou 75,8% a mezi koncovkou a trubicí 82,6%.



Obr.44 Makrostruktura pájeného spoje. příčný řez - trubka č.10

5.7.2 Vyhodnocení experimentu indukčního pájení

Bylo zhotoveno 10 trubic z vysokolegované oceli, které se indukčně pájely. Požadavek byl o co nejkvalitnější spoj. Vyhodnocování proběhlo v laboratoři firmy ZKL Hanušovice. V procentech musela být zapájená plocha minimálně 80%. Vyhodnocení všech deseti trubic je znázorněno v tab.12 a 13.

Tab. č.12 Vyhodnocení výsledků indukčního pájení - podélný řez

	Podélný řez		
	Mezi přírubou a trůbkou	Mezi držákem a koncovkou	Mezi koncovkou a trůbkou
Trůbka č. 1	100% (vyhovující)	75.9% (nevyhovující)	100% (vyhovující)
Trůbka č. 2	81.1% (vyhovující)	80.1% (vyhovující)	85.6% (vyhovující)
Trůbka č. 3	100% (vyhovující)	81.3% (vyhovující)	94.2% (vyhovující)
Trůbka č. 4	100% (vyhovující)	80.3% (vyhovující)	86.6% (vyhovující)
Trůbka č. 5	100% (vyhovující)	79.8% (nevyhovující)	100% (vyhovující)

Tab. č.13 Vyhodnocení výsledků indukčního pájení - příčný řez

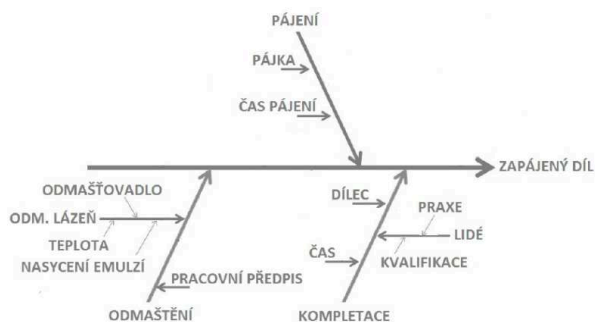
	Příčný řez		
	Mezi přírubou a trůbkou	Mezi držákem a koncovkou	Mezi koncovkou a trůbkou
Trůbka č. 6	82.8% (vyhovující)	87.3% (vyhovující)	86.8% (vyhovující)
Trůbka č. 7	81.6% (vyhovující)	89.8% (vyhovující)	83.5% (vyhovující)
Trůbka č. 8	93.7% (vyhovující)	85.8% (vyhovující)	79.9% (vyhovující)
Trůbka č. 9	96.1% (vyhovující)	68.9% (nevyhovující)	75.7% (nevyhovující)
Trůbka č. 10	82.9% (vyhovující)	75.8% (nevyhovující)	82.5% (vyhovující)

Pro provedení experimentu indukčně pájených dílců se došlo k závěrům, ze kterých vyplývá:

- 4 trůbky z 10 byly nevyhovující,
- zajistit geometrii trůbky tak , aby mezera při pájení byla stejná,
- upravit hrany tak aby pájka rovnoměrně zatékala ,
- vyzkoušet jiný tvar induktoru.

5.8 Návrh snížení zmetkovitosti indukčně pájeného dílce

Návrh na snížení zmetkovitosti vznikl v souvislosti s projektem V6 TDI do sériové výroby v oblasti pájení nerezových dílů. Pro návrh ke snížení zmetkovitosti využita statická regulace. Příkladem pro řešení zmetkovitosti byl rozpad procesů na dílčí hodnoty dle Ishikawova diagramu.



Obr. 45 Diagram příčin a následků pájení

5.8.1 Vliv odmaštění dílu

Mezi základní předpoklad pro úspěšně zapájený spoj je důkladné odmaštění dílů, které budeme pájet. . Na správné odmaštění dílu se podílejí další faktory:

- odmašťovací zařízení,

Mělo by se jednat o takové zařízení, které je vybaveno systémem, který umožňuje odmašťovat díly různých velikostí, tvarů a materiálu. Při odmaštění se používá zařízení Atoll 800, který vyhovuje požadavkům na odmaštění nerezových dílů. Pravidelné kontroly lázně v zařízení tvoří předpoklad pro odmaštěný díl, který je následně připravený pro pájení.

- odmašťovací lázeň,

Odmašťovací lázeň tvoří základ pro vyhovující odmaštění. K parametrům, které nám ovlivňují odmaštění patří:

1. Teplota lázně.
2. Vhodné odmašťovadlo.
3. Nasycená lázeň emulzí.

Lázeň musí odstraňovat nečistoty, které vznikají na dílu v průběhu operací jako je ohýbání nebo stehování. U těchto operací vzniká velmi mnoho nečistot.

- technologický postup.

Technologický postup stanovuje sled dané operace. V technologickém postupu je zapotřebí důkladně popsat jak postupovat při jednotlivých úkonech a minimalizovat vliv lidského faktoru na nepříznivý proces.

5.8.2 Vliv kompletace dílu před indukčním pájením

Vzhledem k důležitosti a odbornosti operace, jsou pracovníci řádně seznámeni a proškoleni s danou problematikou. K zajištění snížení lidského faktoru na proces přispívá video dokumentace při kompletaci dílu, která má zajistit co nejnížší počet chyb při kompletaci dílu do sestavy před pájením.

5.9 Vady, které vznikaly při indukčním pájení

Při indukčním pájení nerezových trubek šlo především o kvalitu spoje a také o vzhled. Při pájení nejčastěji vznikaly vady typů:

- spoj nebyl zapájený po celém obvodu trubky,
- špatné zatečení pájky do spoje ,
- stečení pájky po trubce (vzhledově nevyhovující).

Tyto nejčastější vady měly za následek špatně zapájený spoj. Při tlakové zkoušce byl spoj nevyhovující, kdy vzduch utíkal spojem.



Obr. 46 Stečení pájky po nerezové trubce



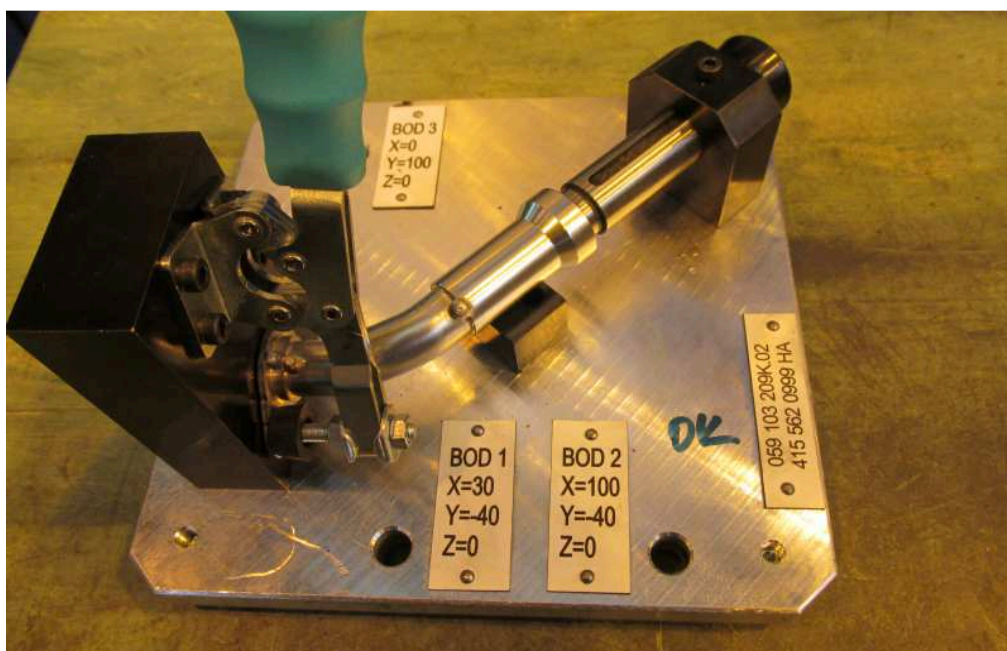
Obr.47 Stečení pájky po nerezové trubce - detail

5.10 Operace odvzdušňovací trubky po indukčním pájení

Po indukčním pájení se trubka značí fixem, kdy držák na trubce směřuje vzhůru viz obr. 48. Dále se trubka vkládá do kontrolního přípravku, kde se kontroluje zda nedošlo k deformaci tvaru. Čep, který se nasouvá do koncovky musí jít nasunout volně.



Obr.48 Ruční značení trubky fixem



Obr.49 Kontrola tvaru

Ještě před zkompletování obou částí je na obě trubky nasazen O-kroužek. O-kroužky se nasazují u koncovky z vnějšku a u příruby se O-kroužek nasazuje zevnitř. Po zkompletování obou částí vysokolegované trubky se opět kontroluje tvar celého dílce v přípravku pro kontrolu tvaru viz. obr. 50.



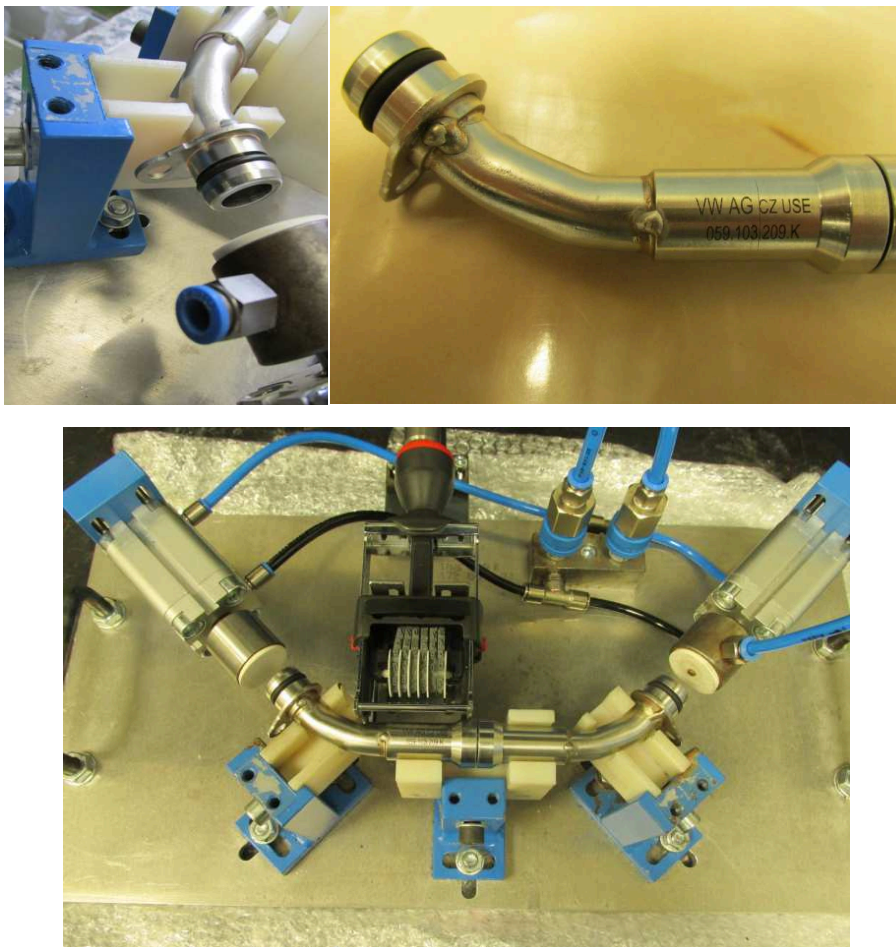
Obr.50 Kontrola tvaru celého dílce

Jedna z posledních operací je značení, kontrola těsnosti a konečné balení kompletního dílce. Operace kontroly těsnosti a značení se provádí na jednom přípravku viz. obr. 51. Finální balení je znázorněno na obr. 53.

Kontrola těsností se provádí tlakováním. Parametry tlakování jsou znázorněny v tab. 14. Zkušební medium je stlačený vzduch, který má mít teplotu $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Zkušební tlak 2,5bar. Povolený únik je 2ml/min. Tlakování se provádí na přístroji Ateq F620.

Tab.14 Parametry pro tlakování

Přívodní tlak	4 až 6	bar
Povolený únik max.	0,5	cm ³ /min
Pracovní tlak	2,5 + 0,5	bar
Doba plnění	4±2	s
Stabilizační čas	12±2	s
Čas testu	7+2	s
Vypouštěcí doba	1,2±1	s
Objem	35	cm ³



Obr.51 Kontrola těsnosti a značení trubky

Pokud kontrola těsnosti (tlakování) proběhne v pořádku zobrazí se na přístroji zelené proužky na krajích displeje viz. obr. 52



Obr. 52 Přístroj Ateq F620



Obr. 53 Konečné balení zhotoveného dílce

6. Závěr a zhodnocení dosažených výsledků

Problematika pájení trubky z vysokolegované oceli je součástí výzkumu firem, které se zaměřují na výrobu odvzdušňovací trubky jako na hlavní sortiment jejich výrobků. Aplikace nerezových slitin z pohledu svařování a pájení je stále problematická z důvodu uvedených v diplomové práci. Trubky z vysokolegovaných ocelí nacházení stále větší uplatnění v automobilovém průmyslu, díky jejich mimořádně korozním a pevnostním vlastnostem se počítá s jejich vyšším využitím v aplikaci pájení.

V teoretické části práce jsou základní údaje o pájené trubce z vysokolegované oceli. Dále jsou uvedeny vady které vznikají při indukčním pájení. V dalších kapitolách je charakterizováno indukční pájení. V poslední části jsou rozebrány pájky na bázi mědi a zařízení, které se používají pro indukční pájení.

V experimentální části práce byl řešen návrh pájení trubky z vysokolegované oceli procesem indukčního ohřevu. Cílem této diplomové práce byl navrhnout postup, technologii, a zařízení pro indukční pájení. Pájka musela být na bázi mědi. Na vytvoření pevného a kvalitního spoje má vliv mnoho faktorů. Mezi tyto faktory patří induktory, účinnost ohřevu, vzdálenost cívky, frekvence, příkon, atd. Dále byly vyhodnoceny v experimentální části výsledky pájených spojů. Zkoušky se prováděly v ZKL Hanušovice. Jednalo se o destruktivní zkoušky (makrostruktura). Poslední částí této práce bylo navržení snížení zmetkovitosti využitím Ishikawova diagramu, kde se provedl rozpad operací, které významně ovlivňují proces indukčního pájení.

Výsledky této práce jsou již ve firmě ZKL Hanušovice, a.s vedly k postupnému snižování zmetkovitosti daného sortimentu a přispěly ke zvýšení produktivity práce ve firmě. Cenným přínosem této diplomové práce pro firmu je zpřehlednění problematiky pájení zejména při nových projektech.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval všem, kteří mi byli nápomocní při zpracování této diplomové práce. Tímto děkuji panu Ing. Vladislavu Ochodkovi., za odborné rady, vedení a připomínky při zpracování diplomové práce. Dále bych také chtěl poděkovat kolegům a zaměstnancům firmy ZKL Hanušovice, za rady a připomínky ohledně zpracování diplomové práce.

Použitá literatura

- [1] Ruční zpracování technických materiálů II: pájení. [online]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: http://elearning.sousvitavy.cz/repository/DUMY/technicke_materialy/VY_32_INOVACE_OVZ_3_06.pdf
- [2] Teplotní rozmezí pájení. [online]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <https://pajenitechnologie.files.wordpress.com/2011/05/121.jpg>
- [3] SALZMAN, Bc. Jan. DIPLOMOVÁ PRÁCE: Pájené spoje vinutí elektrických točivých strojů. [online]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2700/Salzman_DP_2012.pdf?sequence=1
- [4] RUŽA, Viliam a Jindřich KLÚNA. *Pájení*. Praha, 1988.
- [5] ROBERTS, Philip. *Industrial brazing practice*. Second edition. xxvii, 432 pages. ISBN 978-146-6567-740.
- [6] Pájení kovů: PÁJKY, TAVIDLA, PÁJECÍ PASTY, DRÁTY PRO MIG PÁJENÍ. [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: http://www.bohler-uddeholm.cz/media/Pajeni_Fontargen.pdf
- [7] RAYNOCH, Jiří. Pájení a lepení. [online]. 2012 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.sps-vitkovice.cz/projekt2/projekt/texty/STT/M%C5%A02%20-%20P%C3%81JEN%C3%8D.pdf>
- [8] Stainless steels: Part 1: List of stainless steels. [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://www.baltvent.ru/files/bb/en_10088-1.pdf
- [9] EFD Induction: Sinac 6/10 SM. [online]. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://www.efd-induction.com/en/Products/Sinac/Medium/6_10_SM.aspx
- [10] SKEWES, S. a K. KRAUSE. *Induction Brazing* [online]. 2007 [cit. 2015-04-13].
- [11] ZKL Group: *Historie je základem současnosti a výzvou pro budoucnost* [online]. [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/>
- [12] *Elements of the Brazing Process: CHAPTER 3* [cit. 2015-04-13]

[13] Indukční pájení. [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.bodycote.com/cs-CZ/services/metal-joining/induction-brazing.aspx>